ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

ANNEE 1981 N° 50

# LES COMPLEMENTS MINERAUX DANS L'ALIMENTATION DES BOVINS EN CROISSANCE

# THESE

POUR LE DOCTORAT VETERINAIRE

(diplôme d'Etat)

présentée et soutenue publiquement en 1981

devant

L'UNIVERSITE PAUL-SABATIER DE TOULOUSE

par

**André, Gérard, Alain BOUVIER**

**Né le 21 Septembre 1953 à LA CHAPELLE SOUEF (Orne)**

JURY :

Président :

M. ECALLE, Professeur à l'Université Paul-Sabatier de Toulouse

Assesseurs :

M. GRIESS, Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

M. FALIU, Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Association des Elèves
ENVT

# LES COMPLEMENTS MINERAUX DANS L'ALIMENTATION DES BOVINS EN CROISSANCE

THESE

André, Gérard, Alain BOUVIER

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

ANNEE 1981 N° 50

# LES COMPLEMENTS MINERAUX DANS L'ALIMENTATION DES BOVINS EN CROISSANCE

# THESE

POUR LE DOCTORAT VETERINAIRE

(diplôme d'Etat)

présentée et soutenue publiquement en 1981

devant

L'UNIVERSITE PAUL-SABATIER DE TOULOUSE

par

**André, Gérard, Alain BOUVIER**

**Né le 21 Septembre 1953 à LA CHAPELLE SOUEF (Orne)**

JURY :

Président :

M. ECALLE, Professeur à l'Université Paul-Sabatier de Toulouse

Assesseurs :

M. GRIESS, Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

M. FALIU, Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Association des Elèves
ENVT

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

DIRECTEUR ..... M. LAUTIE

DIRECTEURS HONORAIRES ..... M. FLORIO

PROFESSEURS HONORAIRES ..... MM. BRIZARD
BERTHELON
SAURAT

## PERSONNEL ENSEIGNANT

### CHAIRE DE PHARMACIE ET TOXICOLOGIE

Professeur titulaire ..... M. GODFRAIN
Professeur sans Chaire ..... Mme BURGAT-SACAZE

Pharmacie et Toxicologie

### CHAIRE DE PHYSIQUE ET CHIMIE BIOLOGIQUES ET MEDICALES

Professeur titulaire ..... MM. RICO
Professeur sans chaire ..... BRAUN
Maître-Assistant ..... BENARD

Physique Biologique et Médicale
Chimie Biologique et Médicale

### CHAIRE D'ANATOMIE DES ANIMAUX DOMESTIQUES

Professeur titulaire ..... MM. PAVAUX
Maître-Assistant ..... LIGNEREUX
Maître-Assistant ..... SAUTET

Anatomie descriptive - Extérieur -
Anatomie appliquée - Tératologie.

### CHAIRE DE PHYSIOLOGIE ET THERAPEUTIQUE

Professeur titulaire ..... MM. RUCKEBUSCH
Professeur sans Chaire ..... FARGEAS
Maître-Assistant Agrégé ..... TOUTAIN

Physiologie - Pharmacodynamie et
Thérapeutique

### CHAIRE D'HISTOLOGIE - ANATOMIE PATHOLOGIQUE

Professeur titulaire ..... MM. VAN HAVERBEKE
Professeur sans Chaire ..... CABANIE
Maître-Assistant Agrégé ..... MAGNOL

Histologie - Embryologie
Anatomie Pathologique

### CHAIRE D'HYGIENE ET INDUSTRIE DES ALIMENTS D'ORIGINE ANIMALE

Professeur titulaire ..... MM. LABIE
Maître de Conférences ..... EECKHOUTTE
Maître-Assistant Agrégé ..... Mme BENARD

Hygiène, Inspection, Contrôle et Technologie
des Denrées Alimentaires d'Origine Animale

### CHAIRE DE PARASITOLOGIE ET MALADIES PARASITAIRES

Professeur titulaire ..... MM. DORCHIES
Maître de Conférences ..... FRANC
Maître-Assistant ..... DUCOS DE LAHITTE

Zoologie appliquée - Parasitologie externe
Parasitologie interne - Clinique

CHAIRE DE SEMIOLOGIE ET PATHOLOGIE MEDICALE DES EQUIDES ET CARNIVORES

Professeur titulaire ..... MM. LESCURE
Maître de Conférences ..... GUELFI
Maître-Assistant ..... REGNIER

Sémiologie et Pathologie Médicale des
Equidés et Carnivores.
Législation Vétérinaire et Déontologie
Clinique

CHAIRE DE PATHOLOGIE MEDICALE DU BETAIL ET DES ANIMAUX DE BASSE-COUR

Professeur titulaire ..... MM. TOURNUT
Maître de Conférences ..... BEZILLE
Maître-Assistant ..... JOUGLAR

Sémiologie et Pathologie Médicale du
Bétail et des Animaux de Basse-Cour -
Clinique - Clinique ambulatoire

CHAIRE DE PATHOLOGIE CHIRURGICALE

Professeur titulaire ..... MM. CAZIEUX
Maître-Assistant Agrégé ..... GENEVOIS
Maître-Assistant ..... AUTEFAGE

Propédeutique et Sémiologie Chirurgicale
Technique Chirurgicale - Pathologie Chirurgicale
Clinique

CHAIRE DE PATHOLOGIE DE LA REPRODUCTION

Professeur titulaire ..... MM. FERNEY
Professeur sans Chaire ..... ROYAL
Maître-Assistant Agrégé ..... TAINTURIER

Sémiologie et Propédeutique
Pathologie de la Reproduction - Obstétrique
Clinique

CHAIRE DE MALADIES CONTAGIEUSES - ZOONOSES - LEGISLATION SANITAIRE

Professeur titulaire ..... MM. CHANTAL
Maître de Conférences ..... GANIERE
Maître-Assistant ..... PICAVET

Maladies contagieuses - Zoonoses
Législation Sanitaire

CHAIRE DE PATHOLOGIE GENERALE - MICROBIOLOGIE - IMMUNOLOGIE

Professeur titulaire ..... MM. LAUTIE
Maître-Assistant ..... PELLERIN

Microbiologie - Immunologie
Pathologie Générale

CHAIRE DE ZOOTECHNIE ET ECONOMIE RURALE

Professeur titulaire ..... MM. QUEINNEC
Professeur sans Chaire ..... DARRE
Maître-Assistant ..... Mme QUEINNEC

Ethnologie - Génétique appliquée
Hygiène Générale - Zootechnie - Elevage
Economie Générale et des Productions Animales

CHAIRE D'ALIMENTATION

Professeur titulaire ..... MM. FALIU
Professeur sans Chaire ..... GRIESS

Botanique appliquée et Bromatologie
Agronomie - Alimentation

---

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

MM. les Professeurs ANGELIER, ARMENGAUD, AUVERGNAT, BLANC, BOURBON, COMBES, COMBRET, CROS, FERNET, LE BIHAN, MAZENC, RIVES.

---

La Faculté et l'Ecole déclarent n'être pas responsables des opinions émises par les candidats (délibération de la Faculté en date du 10 mai 1891 et du Conseil de l'Ecole en date du 13 juin 1924).

A MES PARENTS

A MA FEMME

A MA FILLE

A MA FAMILLE

A TOUS MES AMIS

A N O T R E P R E S I D E N T D E T H E S E

Monsieur le Professeur ECALLE,
de l'Université Paul-Sabatier de Toulouse

Pour le très grand honneur qu'il nous a fait d'accepter la présidence de notre jury de thèse.

Hommage très respectueux.

A N O T R E J U R Y D E T H E S E

Monsieur le Professeur D. GRIESS,
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pour nous avoir suggéré le sujet de notre thèse,
Pour les conseils éclairés qu'il nous a prodigués et l'attention bienveillante portée à l'élaboration de ce travail,
Qu'il trouve ici l'assurance de notre vive reconnaissance.

Monsieur le Professeur L. FALIU,
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pour avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse,
Qu'il en soit remercié.

A Monsieur HENNEGUEZ,
de l'A.P.C.

Pour l'accueil qu'il nous a réservé, qu'il en soit remercié.

# P L A N

INTRODUCTION..... p. 1

A - IMPORTANCE DES MINERAUX CHEZ LES BOVINS EN CROISSANCE..... p. 3

I - Rappels sur les recommandations en minéraux..... p. 3

1. Détermination des besoins..... p. 3

a) Méthode de calcul

b) Expression des résultats

2. Recommandations en macro-éléments..... p. 9

a) Calcium et phosphore

b) Magnésium

c) Potassium

d) Sodium et chlore

e) Soufre

3. Recommandations en oligo-éléments..... p.17

a) Fer

b) Cuivre

c) Cobalt

d) Manganèse

e) Zinc

f) Molybdène

g) Iode

h) Sélénium

II - Les carences en minéraux chez les bovins en croissance p. 20

1. Les limites de carence..... p. 20

2. Carences en macro-éléments..... p. 21
a) Calcium et phosphore
b) Magnésium
c) Potassium
d) Chlorure de sodium

3. Carences en oligo-éléments..... p. 24
a) Fer
b) Cuivre
c) Cobalt
d) Zinc
e) Manganèse
f) Sélénium
g) Iode

4. Diagnostic des carences..... p. 27

III - Toxicité des minéraux chez les bovins en croissance. p. 35
1. Seuils de toxicité..... p. 35

2. Signes de toxicité..... p. 35
a) Chlorure de sodium
b) Soufre
c) Cuivre
d) Molybdène
e) Sélénium

B - LES COMPLEMENTS MINERAUX : LEUR FABRICATION..... p. 41

I - Les matières premières..... p. 41
1. Les phosphates..... p. 41
a) Origine des phosphates
b) Différents types de phosphates

IV - Législation concernant les composés minéraux..... p. 64
1. Loi du 1er août 1905..... p. 64
2. Loi du 3 février 1940 : "Loi Aveline"..... p. 65
3. Actualisation (Décret du 28 novembre 1973)..... p. 65
4. Arrêté du 19 juillet 1976..... p. 68

C - APPLICATIONS PRATIQUES..... p. 71

I - Composition des aliments..... p. 71
1. Rappels sur les principaux facteurs de variation de la composition des aliments..... p. 71
a) Le sol
b) La fumure
c) Qualité des fourrages
d) Présentation des aliments
e) Interactions des différents éléments
2. Tables de composition des aliments..... p. 87
a) Macro-éléments
b) Oligo-éléments

II - Méthodes de complémentation..... p. 96
1. Fourrages sur pied..... p. 96
a) Cuivre
b) Zinc
c) Cobalt
d) Manganèse
2. Apports à l'animal..... p. 99
a) Libre service
b) Incorporation à la ration de base
c) Voie parentérale

c) Qualité des différentes sources
d) Traitements des phosphates bruts

2. Autres sources de macro-éléments..... p. 48
a) Calcium
b) Magnésium
c) Sodium
d) Soufre

3. Sources d'oligo-éléments..... p. 54
a) Fer
b) Cuivre
c) Zinc
d) Manganèse
e) Cobalt
f) Iode

II - Qualité et valeur alimentaire des composés minéraux. p. 57
1. Tests de qualité des phosphores..... p. 57
a) Solubilité dans l'eau
b) Extraction au citrate d'ammonium
c) Solubilité dans l'acide chlorhydrique dilué
d) Extraction par l'acide citrique à 2 %
e) Résultats

2. Valeur alimentaire des composés minéraux..... p. 60
a) Appréciation de la valeur alimentaire
b) Critères de qualité d'un composé

III - Présentation d'un complément minéral..... p. 62
1. Solide..... p. 62

2. Complémentation incluse sur support organique..... p. 64

3. Liquides..... p. 64

III - Méthodes de choix d'un complément..... p. 103

1. Mode de calcul de l'apport..... p. 103

a) Etude des rations

b) Evaluation de la complémentation

c) Exemple de calcul

2. Choix et classification des compléments..... p. 105

a) Classification en fonction du rapport phospho-calcique

b) Choix en fonction de la qualité

c) Présence d'oligo-éléments

d) Le prix

3. Exemples d'apport..... p. 109

a) Composition des aliments utilisés

b) Jeunes en croissance

c) Boeufs abbatus à 36-40 mois

d) Taurillons

e) Complémentation en sodium et oligo-éléments

CONCLUSION..... p. 123

ANNEXE : Extraction du phosphore par l'acide citrique à 2 %..... p. 127

BIBLIOGRAPHIE..... p. 129

# INTRODUCTION

L'importance des compléments minéraux dans l'alimentation des bovins en croissance n'est plus à démontrer. L'accroissement des effectifs dans les troupeaux, la recherche d'une plus grande rentabilité, les cultures de plus en plus intensives et le coût des produits, nécessitent de bien maîtriser l'alimentation minérale des animaux.

Dans ce travail, nous considèrerons les principaux minéraux : macro-éléments et oligo-éléments. Nous rappellerons, dans un premier chapitre, les besoins évalués par différents auteurs, ainsi que les données relatives aux carences et à la toxicité éventuelle. Ensuite, nous nous intéresserons aux matières premières utilisées dans la fabrication des composés minéraux, à la fabrication proprement dite, ainsi qu'à la législation française actuellement en vigueur.

Dans un dernier temps, nous étudierons les facteurs qui guident le choix d'une complémentation, et nous donnerons quelques exemples de rations couramment pratiquées.

# A - IMPORTANCE DES MINERAUX CHEZ LES BOVINS EN CROISSANCE

## I - Rappels sur les recommandations en minéraux

### 1. Détermination des besoins

#### a) Méthode de calcul

Les besoins en minéraux des bovins varient au cours de leur existence. Il existe des périodes critiques pendant lesquelles ces besoins sont plus importants :

- période de croissance active,
- puberté,
- gestation,
- lactation.

Pour calculer les besoins en minéraux, il faut considérer la digestibilité et la rétention tissulaire des différents éléments.

L'efficacité minérale tient compte de la quantité ingérée et des quantités excrétées, par voies fécale et urinaire (LAMAND, 1975).

Le métabolisme minéral obéit à certaines règles :

— Si la teneur de la ration s'élève, la digestibilité diminue, mais la quantité fixée augmente.

— Au-delà d'une certaine ingestion, la digestibilité atteint un palier, les organes de stockage et les voies d'excrétion se saturent. Une intoxication peut alors se manifester.

— Si la teneur de la ration diminue, la digestibilité augmente, mais la quantité retenue diminue.

— En deçà d'un certain seuil de carence, l'absorption intestinale est à un palier maximal, la rétention ne couvre plus l'excrétion endogène minimale. Des symptômes de carences se manifestent alors. L'animal perd plus de minéraux qu'il n'en ingère.

Il est bien évident que les besoins calculés et les recommandations qui en découlent sont relatifs. Car les facteurs intervenant sur l'animal et son environnement sont très nombreux et variables.

Nous distinguons d'abord les besoins nets, c'est-à-dire la quantité d'éléments minéraux excrétée ou fixée au cours de l'entretien ou de la croissance des animaux.

Pour l'entretien, ces besoins correspondent aux pertes dues au renouvellement tissulaire, au fonctionnement du tube digestif, aux différentes sécrétions. Par exemple, un bovin à l'entretien perd environ 18 mg de calcium et 25 mg de phosphore par kg de poids et par jour (GUEGUEN, 1978).

Les besoins de croissance sont déterminés par la quantité de minéraux fixés dans les os et les tissus mous de l'organisme. Par exemple, un bovin pesant 100 kg fixe 15 g de calcium et 8 g de phosphore par kg de gain de poids (GUEGUEN, 1978).

Nous envisageons ensuite les facteurs qui interviennent sur l'apport alimentaire pour assurer la couverture du besoin net : l'utilisation digestive et l'utilisation métabolique.

— L'utilisation digestive est définie par le coefficient d'utilisation digestive réel (CUDr) qui représente la proportion de la quantité ingérée réellement absorbée dans le tube digestif pour 100.

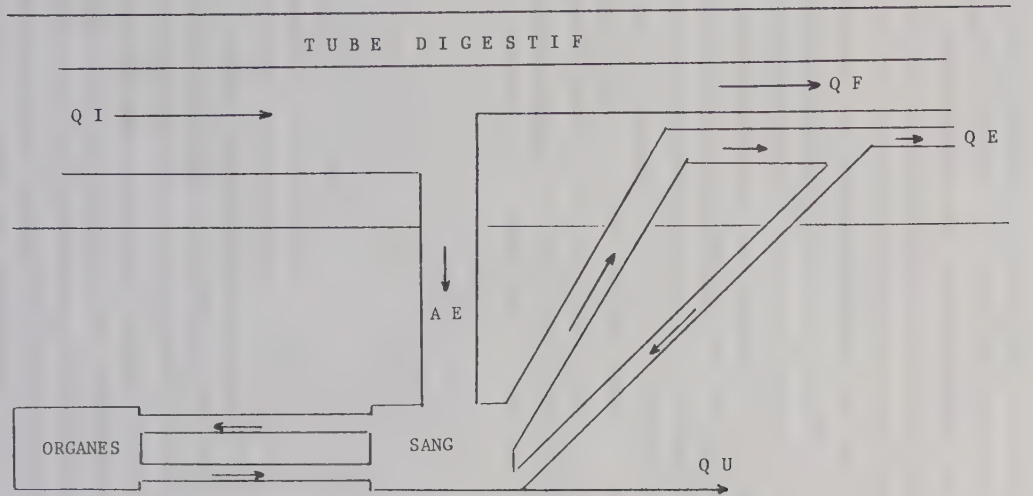
Le CUDr se détermine par l'équation :

$$CUDr = \frac{QI - (QF - QE) \times 100}{QI}$$

QI = quantité ingérée
QF = quantité excrétée dans les fèces
QE = quantité d'origine endogène
QU = quantité excrétée dans les urines
AE = absorption réelle

— L'utilisation métabolique peut s'apprécier par la perte urinaire. Chez les bovins, la quantité excrétée dans l'urine est en général négligeable pour le calcium et le phosphore, faible pour le magnésium. Elle est cependant très importante pour le sodium, le potassium et le chlore.

Figure A 1 : Calcul du coefficient d'utilisation digestive réelle
(schéma modifié d'après GUEGUEN, LAMAND et SOYEUX, 1975).



A partir de ces données, on peut calculer l'apport dans la ration en multipliant les besoins nets plus l'élimination urinaire par le coefficient d'utilisation digestive réelle. A ces résultats, on peut ajouter une marge de sécurité, tenant compte des approximations dans les quantités ingérées et des facteurs de variabilité individuelle.

Le problème des oligoéléments est un peu différent en ce sens que la détection et la quantification précoces des déséquilibres sont plus difficiles. Les apports recommandés sont plus imprécis. Dans la pratique, les apports recommandés sont fondés sur les limites de carence.

Ces limites sont définies comme étant les teneurs pour lesquelles la fréquence et la gravité des accidents tendent vers zéro. A cette teneur limite, on ajoute une marge de sécurité (LAMAND, 1978).

On peut également pratiquer des essais alimentaires sur de longues périodes et déterminer les apports selon les performances zootechniques et l'état de santé de l'animal. Compte tenu des nombreux facteurs de variations, cette dernière méthode est très imprécise et trop empirique pour être retenue.

b) Expression des résultats

Les apports recommandés dans une ration varient considérablement en fonction du poids vif de l'animal et de sa vitesse de croissance. Par exemple, 20 à 25 g de calcium et 10 à 15 g de phosphore par jour sont nécessaires pour des bovins pesant 200-300 kg à faible vitesse de croissance, alors qu'il faut 50-65 g de calcium et 35-40 g de phosphore par jour pour des animaux pesant 400-500 kg à faible gain quotidien (GUEGUEN, 1978).

Ces besoins sont exprimés par catégorie d'animaux en fonction de leur poids et de leur gain moyen quotidien (GMQ) ou en g/kg de matière sèche ingérée (MSI), ce qui est plus pratique, mais souffre des approximations liées à l'appréciation de la capacité d'ingestion de ces animaux (cf. figure A 2 représentant l'évolution de ces besoins).

L'ingestion d'aliment peut se déterminer à partir des Unités d'Encombrement. L'Unité d'Encombrement (UE) dépend des deux facteurs qui règlent la quantité d'aliment ingérée :

- la capacité d'ingestion, qui dépend de l'animal,
- l'ingestibilité, qui est liée à l'animal.

L'U.E. correspond à une jeune herbe de pâturage qui a une ingestibilité de 75 g/kg x P 0,75 chez le mouton en fin de croissance, et une digestibilité d'environ 0,80 pour la matière organique (JARRIGE, 1978).

Le système des U.E. permet d'attribuer :

1) une seule valeur à la capacité d'ingestion de l'animal, indépendamment de l'ingestibilité des aliments ou des rations ;

2) une seule valeur de l'ingestibilité de l'aliment ou de la ration, indépendamment de la capacité d'ingestion des animaux.

Il est donc admis que l'ingestion volontaire exprimée en U.E. ne varie pas en fonction du gain de poids.

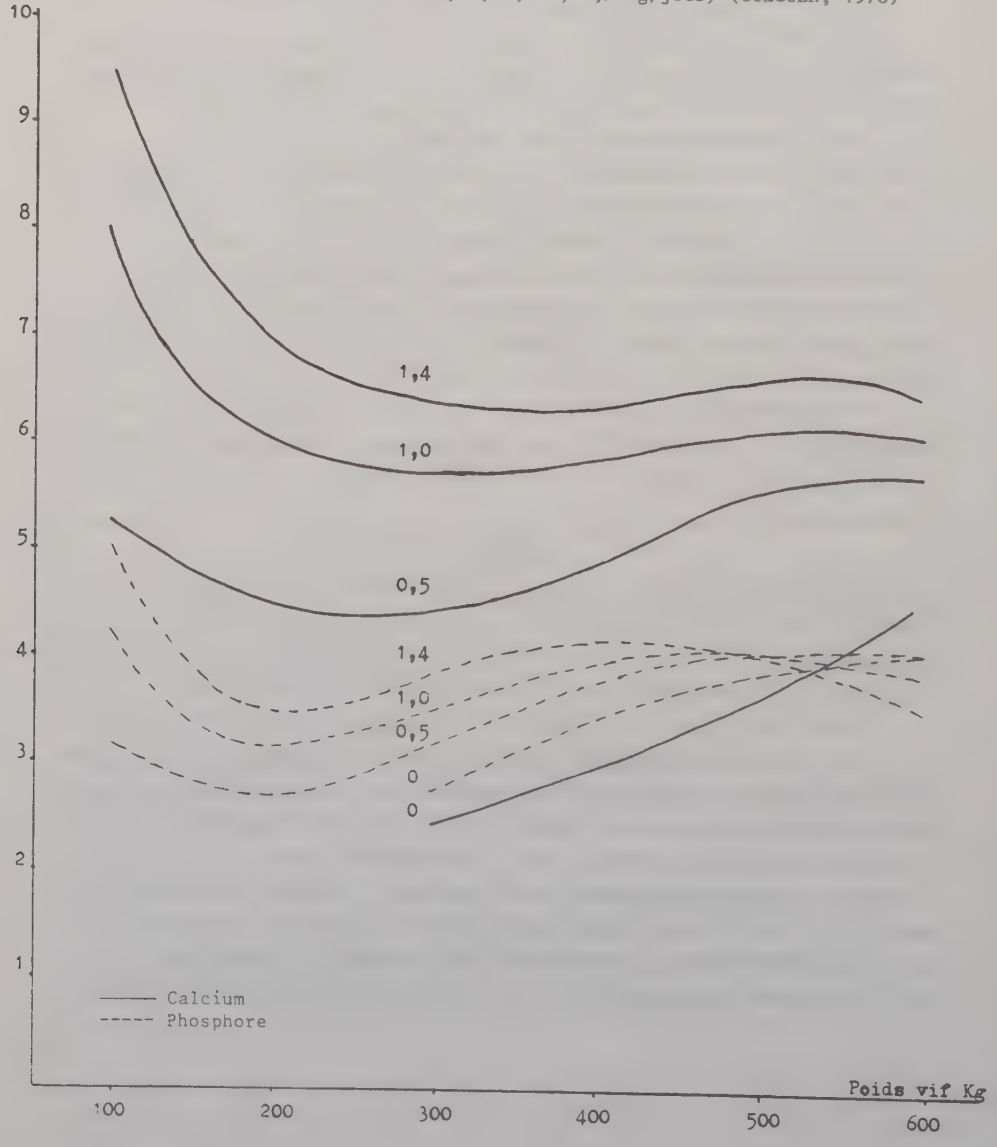
Tableau A 1 : Ingestion volontaire en UE/j. en fonction du poids vif en kg (GUEGUEN, 1978)

| PV (kg) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| UE/j. | 3,5 | 5,7 | 7,4 | 8,8 | 10,0 | 11,1 |

On appelle valeur d'encombrement (VE) d'une ration la valeur exprimée en U.E., obtenue en divisant l'ingestibilité de l'herbe de référence chez le mouton en fin de croissance, soit 75 g/kg P 0,75, par l'ingestibilité de l'aliment mesurée dans les mêmes conditions (JARRIGE, 1978).

Les quantités moyennes de MSI sont aussi obtenues en divisant les capacités d'ingestion mentionnées plus haut par la valeur d'encombrement de la ration qui varie de 1 pour la vitesse de croissance la plus élevée à 1,65 environ pour une croissance nulle.

Figure A 2 : Concentrations en calcium et en phosphore recommandées dans la matière sèche ingérée par les bovins en croissance (pour des croissances de 0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 kg/jour) (GUEGUEN, 1978)



## 2. Recommandations en macro-éléments

### a) Calcium (Ca) et phosphore (P)

Les recommandations sont calculées à partir des besoins d'entretien, de croissance et des CUDr.

- Considérons d'abord les veaux préruminants

Les besoins nets d'entretien sont évalués à 5 mg de P et 12 mg de Ca par kg et par jour (GUEGUEN, 1978).

Pour les besoins de croissance, on peut adopter les valeurs des bovins de 50 à 150 kg, c'est-à-dire 15 g de Ca et 8 g de P par kg de gain de poids vif par jour (GUEGUEN, 1978), chiffres certainement élevés pour des bovins abattus précocement, car une forte minéralisation osseuse n'est pas nécessaire. La part des dépenses d'entretien dans les besoins totaux en P et en Ca est très faible puisqu'elle varie de 5 à 10 % pour des animaux de 50 à 200 kg. Les besoins phosphocalciques du veau de boucherie sont donc essentiellement fonction de la vitesse de croissance.

Les apports alimentaires de Ca et P recommandés sont superposables aux besoins nets puisque le CUDr est proche de 100. Un veau de 100 kg gagnant 1 kg par jour a besoin de 16 g de Ca et de 8,5 g de P, apports pratiquement assurés par le lait entier si le veau pèse moins de 100 kg. Pour les veaux de plus de 100 kg, le lait entier est trop riche en P par rapport au Ca (GUEGUEN, 1978).

- Cas des bovins en croissance (ruminants)

Les valeurs moyennes des CUDr du Ca et du P adoptées pour le calcul des apports alimentaires recommandés sont les suivantes :

Tableau A 2 : Valeur du CUDr en % en fonction du poids vif en kg (GUEGUEN, 1978)

| PV (kg) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CUDR % | Ca | 70 | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 |
| | P | 80 | 75 | 65 | 55 | 55 | 55 |

Ces chiffres sont voisins de ceux calculés par l'Agricultural Research Council (A.R.C.) en 1965, bien que pour le calcium ils soient plus élevés.

• Les besoins d'entretien en calcium

Ils sont évalués à environ 16 mg par jour et par kg (pertes endogènes fécales) et toujours moins de 2 mg de pertes urinaires. Nous atteignons donc le chiffre de 18 mg par kg par jour. Chiffre qui varie peu avec l'âge ou le régime (GUEGUEN, 1978).

• Les besoins d'entretien en phosphore

Les pertes endogènes fécales sont fonction de la nature du régime et de l'apport phospho-calcique. Elles vont de 2 mg par kg par jour chez le veau de lait à 25 mg par kg par jour chez le veau sevré, consommant du concentré et du foin. Quant aux pertes urinaires, elles varient en sens inverse des pertes endogènes fécales de 2 à 10 mg par kg par jour.

Compte tenu de ces éléments, il est possible de préconiser les recommandations suivantes pour les bovins en croissance :

Tableau A 3 : Recommandation en Ca et P pour les bovins en croissance (GUEGUEN, 1977)

| PV en kg | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Besoins en g par kg de gain de poids | Ca | 16 | 15 | 13 | 12 | 10 |
| | P | 9,5 | 8,5 | 7,5 | 6 | 5 |

Ces valeurs sont très proches de celles préconisées par l'A.R.C..

Les apports recommandés dans la ration sont résumés à la fin de ce chapitre en fonction du poids des animaux et de leur vitesse de croissance (tableau A 18).

Il convient également de signaler le rapport phospho-calcique $\frac{Ca}{P}$. Ce rapport doit toujours être supérieur à 1. Le rapport $\frac{Ca}{P}$ recommandé augmente de 1,2 à 1,7 en moyenne avec la vitesse de croissance, ce qui résulte de la diminution de l'importance relative des besoins d'entretien par rapport aux besoins totaux. Un rapport $\frac{Ca}{P}$ plus élevé n'a aucune conséquence défavorable ni sur l'utilisation du P, ni sur le développement osseux dans la mesure où les quantités de Ca, de P et de vitamine D sont suffisantes pour couvrir les besoins de l'animal (GUEGUEN, 1978).

Si l'on compare ces chiffres avec les normes françaises anciennes, on observe des divergences dues au fait que les auteurs ne tenaient pas assez compte des différentes vitesses de croissance. Il fallut attendre 1966 pour avoir des valeurs rapportées à plusieurs niveaux de croissance par GUEGUEN.

En considérant les normes étrangères, nous constatons une similitude avec l'A.R.C. (1965) pour le P, alors qu'elles sont légèrement inférieures pour le Ca chez les bovins pesant plus de 300 kg.

Le N.R.C. (National Research Council - U.S.A.), en 1976, a modifié ses normes.

En ce qui concerne le P, les recommandations françaises pour les animaux de moins de 300 kg à gain quotidien de 1 kg sont inférieures à celles du N.R.C.. A plus de 300 kg, les normes françaises sont supérieures. Pour le Ca, les valeurs américaines sont très basses : 20 g/j pour des animaux de 500 kg. En france, les normes sont 3 fois supérieures. Elles sont cependant identiques en début de croissance.

Nous observons également un apport constant de P et une diminution en Ca pour un même gain quotidien au cours de la croissance de l'animal. Cela est peu concevable, puisque la capacité d'absorption du tube digestif diminue avec l'âge et que les besoins augmentent.

b) Magnésium (Mg)

Contrairement à ce que nous avons vu pour le Ca et le P, les apports recommandés de Mg varient peu avec le gain de poids journalier.

- Veau de lait

L'hypomagnésiémie du veau nourri au lait démontre bien que ce produit est pauvre en magnésium, mais les besoins nets du veau ne sont pas connus.

BLAXTER et al. (1954) recommandent 160 à 180 mg de Mg par litre de lait pour les veaux âgés de 3 mois.

Dans la pratique, il est préférable de doubler la valeur du lait, c'est-à-dire d'en apporter 2 g par kg MS (GUGGUEN, 1978).

- Bovins en croissance

Il est très difficile de donner un CUDr du Mg, car les données concernant cet élément sont peu nombreuses. L'A.R.C. (1965) donne un taux de 20 à 30 %. GARCES et al. (1971) obtiennent des valeurs beaucoup plus élevées, de l'ordre de 50 à 60 % pour des rations non basées sur de l'herbe fraîche. Il se peut que la nature de la ration et de l'apport supplémentaire de Mg influent sur l'absorption de cet élément. Il faut donc introduire une marge de sécurité et nous adopterons les valeurs de GUEGUEN (1978) :

Tableau A 4 : CUDr du Mg en % en fonction du poids vif en kg (GUEGUEN, 1978)

| PV (kg) | 100 | 200 | 300 | 400 |
|---|---|---|---|---|
| CUDr (Mg %) | 50 | 40 | 30 | 25 |

ZINTZEN (1972), donne les valeurs suivantes de disponibilité en % (digestibilité apparente, c'est-à-dire ne tenant pas compte de l'excrétion endogène).

Tableau A 5 : Digestibilité apparente du Mg des veaux (ZINTZEN, 1972)

| Veaux | Mg |
|---|---|
| Jusqu'à 4 semaines | 66 % |
| 4 à 6 semaines | 40 - 50 % |
| 6 à 10 semaines | 30 % |
| 10 à 16 semaines | 20 % |
| Bovins d'élevage | 16,6 - 20 % |

Les besoins nets en Mg des animaux à l'entretien sont d'environ 3 mg par kg de poids vif par jour (GUEGUEN, 1978) et les besoins pour la croissance de 0,4 g par kg de gain de poids entre 50 et 600 kg de poids vif, et 0,3 g au-delà de 600 kg (GUEGUEN, 1978). L'A.R.C. ainsi que GUNTHER (1972) préconisent des recommandations identiques.

Nous obtenons ainsi les apports suivants en g par jour par animal.

Tableau A 6 : Apports de Mg recommandés en g/j (GUEGUEN, 1978)

| PV (kg) | Gain de poids en g par jour | | |
|---|---|---|---|
| | 300 à 700 | 700 à 1 000 | 1 000 à 1 400 |
| 100 | 1,0 | 1,3 | 1,7 |
| 200 | 2,0 | 2,4 | 2,9 |
| 300 | 3,6 | 4,2 | 4,8 |
| 400 | 5,0 | 6,2 | 7,0 |
| 500 | 6,5 | 7,4 | 8,2 |
| 600 | 7,5 | 8,5 | 9,5 |

Si l'on rapporte ces valeurs à la MS ingérée, cela correspond à environ 1 g de Mg par kg de matière sèche ingérée, pour des bovins pesant plus de 200 kg et ayant une vitesse de croissance de 700 à 1 400 g, ce qui correspond aux normes du N.R.C. (1976).

c) Potassium (K)

Comme pour le Mg, les apports recommandés en cet élément varient peu avec le croît, car les concentrations dans le gain de poids varient peu. D'autre part, le K ne manque pratiquement jamais dans le régime alimentaire, car les rations sont naturellement pourvues en quantité suffisante.

Le jeune veau semble avoir des besoins inférieurs à 50 mg par kg de poids par jour. Le lait en contient 12 g par kg MS et les aliments d'allaitement environ 10 g par kg MS.

Le CUD du K est évalué à 90 ou 100 % (GUEGUEN, 1977). Les pertes endogènes s'élèvent à 45-80 mg par kg de poids vif par jour et les besoins de croissance à 1,6 g par kg de gain de poids (A.R.C., 1965).

GUEGUEN et al. (1978) préconisent 1,6 g par kg de gain de poids pour la croissance et 50 mg par kg de poids par jour pour les besoins nets d'entretien, ce qui se traduit par les normes suivantes :

Tableau A 7 : Apports recommandés en K en fonction du poids vif en kg (GUEGUEN, 1978)

| PV (en kg) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K (en g/j) | 8 | 14 | 20 | 26 | 32 | 38 |

Ces chiffres correspondent à une valeur de 5 g par kg de matière sèche ingérée.

Nous le répétons, les excès sont plus à craindre que les carences, car, par exemple, le dactyle et la fétuque contiennent de 15 à 35 g par kg MS et les céréales entre 3 et 5 g.

d) Sodium (Na), chlore (Cl)

Pour ces éléments, nous avons également peu de données. Mais, la supplémentation est très facile et courante, si bien que nous n'observons que rarement des carences à l'heure actuelle.

Les jeunes veaux nourris au lait semblent avoir des besoins inférieurs à 10 mg par kg de poids et par jour pour le Na. Le lait de vache est suffisamment pourvu (GUEGUEN, 1978).

En ce qui concerne les animaux plus âgés, les données sur l'absorption intestinale sont peu précises, mais il semble que le CUDr aille de 90 à 100 % (GUEGUEN, 1978).

Les pertes endogènes sont également mal connues, mais l'A.R.C. (1965) avance les chiffres de 13 mg de Na et 25 mg de Cl par kg de poids vif et par jour. GUEGUEN (1978) les estime à 10 mg.

Les besoins de croissance sont évalués à 1,4 g de Na et 0,9 g de Cl par kg de gain de poids (GUEGUEN, 1977).

Les besoins en Na dépendent beaucoup de la vitesse de croissance. Il faudra donc en apporter d'autant plus que cette vitesse sera élevée.

On peut résumer ainsi les apports recommandés en Na et Cl :

Tableau A 8 : Apports recommandés en Na et Cl (GUEGUEN, 1978)

| PV (en kg) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Apports de Na (en g) | 3,0 | 5,0 | 6,5 | 8,0 | 9,0 | 12,0 |
| Apports de Cl (en g par jour) | 3,5 | 6,0 | 8,5 | 11,0 | 14,0 | 18,0 |

Ces chiffres correspondent à des valeurs de 1,2 g de Na et 1,5 g de Cl par kg de matière sèche ingérée pour des bovins de 200 kg avec une vitesse de croissance de 700 à 1 400 g par jour.

e) Soufre (S)

Le soufre n'est pas un élément structural à proprement parler parce qu'il n'entre pas dans la composition des os, hormis les cartilages ; par contre, il fugure pour une grande part dans la constitution d'acides aminés très importants. Normalement, l'apport par des acides aminés soufrés suffit, mais lorsqu'on introduit de l'azote non protéique (A.N.P.) dans la ration, un supplément de S est nécessaire pour la synthèse des protéines par les micro-organismes.

Les apports recommandés ne peuvent donc être établis qu'à partir d'essais alimentaires, la méthode factorielle ne pouvant être employée dans ce cas. Les résultats obtenus par ces essais sont variables en fonction de la source de S employée. Les meilleures performances sont obtenues par 1,1 à 1,4 g de S par kg de matière sèche avec un supplément sous forme de méthionine ; 2,4 à 3 g de S par kg de matière sèche avec du sulfate de Na et 4 à 5 g de S élémentaire par kg de matière sèche. Il faut encore préciser l'éventuelle interférence avec le métabolisme d'autres éléments (GUEGUEN, 1978).

Toutefois, GUEGUEN (1978) préconise 1,5 g de S par kg MS pour les régimes classiques et 2 g de S par kg MS pour les régimes supplémentés en A.N.P.. Certains auteurs ont calculé un rapport $\frac{N}{S}$ optimum dans les rations de l'ordre de $\frac{10}{11}$ (ELAM, 1975).

Tableau A 9 : Recommandations en soufre pour obtenir un rapport $\frac{N}{S}$ dans la ration de 10 (ELAM, 1975)

| % protéines | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % Soufre | 0,144 | 0,160 | 0,176 | 0,192 | 0,208 | 0,224 | 0,240 | 0,250 |

### 3. Recommandations en oligo-éléments

Les besoins en oligo-éléments sont déduits des limites de carence auxquelles on ajoute une marge de sécurité raisonnée, afin de ne pas atteindre les seuils de toxicité.

#### a) Fer (Fe)

Le problème du fer doit être considéré sous deux aspects selon que la production concerne le veau de boucherie à viande blanche ou les bovins à viande rouge.

Le cas du veau préruminant à viande blanche ne sera pas traité ici d'une manière approfondie.

Le lait est carencé en fer : on est donc tenté d'augmenter la teneur en fer des laits en poudre avec le risque cependant de produire une viande rouge. Il faut donc trouver un juste équilibre pour obtenir des animaux en bonne santé et à viande blanche.

Cet équilibre semble être atteint avec 15 mg de fer par kg de matière sèche.

A l'étranger, l'exigence de blancheur de la viande étant moins impérative, on préconise de 40 à 50 mg de fer par kg de matière sèche (LAMAND, 1975). Le lait de vache n'en contient que 1,5 à 3,8 mg par kg de matière sèche.

Dans le cas des bovins ruminants, le problème ne se pose plus à partir du moment où les animaux consomment des fourrages grossiers. Les fourrages sont en effet suffisamment pourvus en fer et l'on n'observe pas de carence sur des animaux âgés, non atteints de parasitisme ou autre maladie.

Le besoin en fer est normalement satisfait par une ration renfermant 50 à 80 mg de fer par kg de matière sèche (ZINTZEN, 1972).

#### b) Cuivre (Cu)

En France, les carences en Cu sont fréquentes, car les fourrages en sont insuffisamment pourvus ; 94 % des foins de prairies naturelles contiennent moins de 7 mg de Cu par kg de matière sèche (BELLANGER et al., 1973).

Or, les besoins sont supérieurs à cette valeur. ZINTZEN estime que l'utilisation digestive du cuivre de la ration peut atteindre 30 % chez les bovins.

L'aliment d'allaitement des jeunes devra être complété pour procurer 7 mg de Cu par kg MS (LAMAND, 1977).

Le N.R.C. recommande 4 à 8 mg Cu par kg MS.

L'A.R.C. recommande 10 mg Cu par kg MS.

Ces chiffres sont à respecter, car les risques de toxicité peuvent survenir rapidement au-delà de 10 mg.

c) Cobalt (Co)

Le Co est un élément très important pour les ruminants, car il entre dans la synthèse de la vitamine B 12 par les micro-organismes du rumen. Le Co représente en effet 4 % de la vitamine B 12 (UNDERWOOD, 1962).

Les besoins sont estimés à 0,1 mg/kg MS par l'A.R.C. (1965), ce qui correspond aux recommandations de LAMAND (1977) et UNDERWOOD (1962).

d) Manganèse (Mn)

Le rôle du manganèse dans les accidents de jarret droit est bien connu. Il est donc important de bien supplémenter les rations principalement des jeunes en cet élément. 25 mg Mn par kg MS sont préconisés par UNDERWOOD (1971). L'A.R.C. (1965) préconise 40 mg par ks MS, en prévoyant 100 à 120 mg Mn par kg MS dans le cas d'une ration d'ensilage de maïs enrichie en S ; le soufre interférant sur la digestibilité du Mn (LAMAND, 1978).

e) Zinc (Zn)

Des cas de carence clinique ont été observés chez des veaux recevant un aliment d'allaitement contenant 28 mg/kg MS. Les symptômes ont disparu rapidement après une injection de Zn (LAMAND, résultats non publiés).

L'utilisation digestive du Zn de la ration par les bovins est de 10-20 % (ZINTZEN, 1972). MILLER (1970) recommande une addition de 20-40 mg/kg MS.

LAMAND (1978) et l'A.R.C. (1965) sont d'accord pour une addition de 50 mg de Zn par kg MS. Toutefois, lorsque la ration est constituée d'ensilage de maïs enrichi en soufre épuré, il faut augmenter ces valeurs à 75 mg par kg MS.

f) Molybdène (Mo)

Le Mo est important par sa toxicité, et son métabolisme est complexe. Cet élément interfère avec le Cu et l'ion $SO_4^=$.

Un excès de Mo entraîne de signes de carence en Cu. Le seuil de toxicité est donc d'autant plus élevé que la ration contient plus de Cu.

UNDERWOOD (1966) recommande 2 ppm de la matière sèche si l'ion sulfate est inférieur à 0,4 % et Cu supérieur à 5 ppm d'une part et 8 ppm de la matière sèche si l'ion sulfate est supérieur à 0,4 %, Cu compris entre 20 et 40 ppm d'autre part.

g) Iode (I)

L'iode est un élément très important dans les rations des femelles en gestation afin de prévenir les carences du jeune. L'utilisation de l'iode peut être sous la dépendance des facteurs goitrigènes (crucifères).

L'absorption est estimée à 80-96 % (ZINTZEN, 1972).

L'A.R.C. (1965) préconise 0,12 mg/kg MS si la ration ne contient pas de facteurs goitrigènes. Dans le cas contraire, ces besoins sont à relever à 1,3 mg/kg MS.

Pour les veaux, 0,12 mg/kg MS suffisent et 0,2 mg pour les autres bovins en croissance (LAMAND, 1978).

Le N.R.C. (1963) recommande d'additionner 0,01 pour 1 000 d'iodure de potassium, soit 0,0076 d'I.

h) Sélénium (Se)

La complémentation d'une ration en Se est plus délicate. Il faut une dose minimum pour éviter les myopathies, et ne pas atteindre la dose toxique qui est faible. D'autre part, la législation fixe le taux d'incorporation

maximal dans les aliments du bétail à 0,5 ppm. On recommande donc 0,1 mg par kg de matière sèche (LAMAND, 1978 ; UNDERWOOD, 1966).

## II - Les carences en minéraux chez les bovins en croissance

### 1. Les limites de carence

Nous pouvons définir la limite de carence comme étant la teneur à partir de laquelle la fréquence et la gravité des accidents tendent vers zéro (LAMAND, 1978).

Les valeurs de ces limites sont difficiles à déterminer pour les macroéléments qui représentent la plus grande part des minéraux constituant l'organisme. L'animal puise sur ses réserves (principalement osseuses) avant de manifester des signes de carence. Nous pouvons cependant les assimiler aux besoins nets d'entretien, c'est-à-dire (exprimés en mg par kg de poids par jour) :

Tableau A 10 : Limites de carence en macroéléments (mg/kg PV/j) (GUEGUEN, 1978)

| P | Ca | Mg | K | Na |
|---|---|---|---|---|
| 25 | 18 | 3 | 50 | 10 |

Les oligo-éléments sont en quantité beaucoup moins importante dans l'organisme, et donc les carences sont plus précoces. Les limites sont plus faciles à déterminer à partir d'essais alimentaires ; elles sont les suivantes :

Tableau A 11 : Limites de carence en oligo-éléments (en mg/kg MS = ppm) (LAMAND, 1978)

| Eléments | Cu | Co | I | Mn | Zn | Se |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Teneurs (ppm) | 7 | 0,07 | 0,15 | 45 | 45 | 0,1 |

On estime la limite pour le Fe à 50 ppm (LAMAND, 1975).

Les seuils de carence rapportés aux aliments consommés sont évalués ainsi :

- 4 à 10 ppm de la matière sèche en Cu
- 40 à 50 ppm de Zn
- 50 ppm de Mn

Le Mo ne doit pas dépasser 3 ppm (UNDERWOOD, 1971).

Les valeurs des carences sont exprimées dans le tableau A 21 à la fin de ce chapitre.

2. Carences en macro-éléments

a) Calcium (Ca) et phosphore (P)

La localisation du Ca et du P dans l'organisme est essentiellement osseuse, environ 99 % du Ca et 80-85 % du P total. Leur rôle essentiel est dans la formation du squelette et des dents. Les carences vont donc avoir des répercussions osseuses (rachitisme, ostéomalacie, ostéofibrose et ostéoporose).

Le Ca non osseux intervient dans la perméabilité des membranes cellulaires, la contraction musculaire, l'excitabilité neuro-musculaire et la coagulation sanguine.

Le P intervient dans de nombreuses réactions chimiques, principalement dans les processus énergétiques.

Chez les bovins en croissance, une carence en Ca se traduit principalement par des troubles osseux, provoquant un ralentissement, parfois un arrêt de croissance.

Envisageons les différentes formes :

— Le rachitisme. - C'est une maladie des jeunes animaux en croissance, caractérisée par un défaut de minéralisation de l'os. Ce défaut entraîne un épaississement des articulations, une torsion des membres sous le poids du corps, et une raideur de la démarche. L'éruption des dents est retardée et irrégulière. De plus, l'animal est en mauvais état général. Si l'on fait une coupe de l'articulation, on observe un cartilage plus épais que la normale.

— L'ostéomalacie. - Il s'agit d'une déminéralisation du squelette. Cette maladie ne s'observe pratiquement pas chez les bovins en croissance. Elle est due au prélèvement massif et non compensé de Ca et de P pendant la gestation et la lactation des reproductrices.

— L'ostéofibrose. - Elle est due à une carence secondaire en Ca par les excès de P. Elle s'observe dans les élevages de jeunes bovins exclusivement nourris avec un régime hautement énergétique renfermant beaucoup de céréales et donc une teneur élevée en P et basse en Ca.

Cette maladie se traduit par un arrêt de croissance, une diminution du gain moyen quotidien. Les animaux boitent, sans déformation physique, se couchent et se relèvent difficilement. Il y a donc une douleur osseuse (TOURNUT, 1978).

— L'aphosphorose. - Elle s'observe beaucoup plus dans les conditions naturelles d'élevage. Elle se caractérise par des troubles de l'appétit, du pica, une faible croissance, des ostéodystrophies dans les stades ultimes et surtout des troubles de la reproduction. Chez les génisses destinées à la reproduction, on observe de l'anoestrus, des irrégularités des chaleurs et un retard sexuel.

Toutes ces carences entraînent également une moindre résistance des animaux qui sont plus sensibles aux affections microbiennes et parasitaires.

b) Magnésium (Mg)

Le Mg a un rôle essentiel dans une multitude de réactions enzymatiques et intervient également dans la formation du squelette.

Le trouble le plus couramment observé est la tétanie. Il peut s'agir d'une carence vraie d'apport ou d'une carence secondaire d'utilisation. Une baisse du taux sérique en Mg est fréquemment observée lors des crises de tétanie. Ces symptômes sont facilement compréhensibles par la relation de l'excitabilité neuro-musculaire :

$$E.N.M. = \frac{K \times Na}{Ca \times Mg}$$

La tétanie est observée chez les jeunes veaux (la tétanie hypomagniésiémique du veau) et chez les adultes mâles et femelles (tétanie d'herbage ou de nutrition de la vache laitière et tétanie de transport du boeuf). Elle est beaucoup plus fréquente chez la vache.

— La tétanie du veau. - Elle est due à une carence vraie en Mg chez les veaux de 2 à 4 mois nourris exclusivement au lait entier et ayant le meilleur taux de croissance.

Au début, les animaux sont énervés, présentent de l'hyperesthésie, des contractions de certains muscles (oreilles, yeux) et des tremblements. Ces troubles disparaissent puis deviennent de plus en plus fréquents.

La phase d'état se caractérise par des convulsions cloniques entraînant une difficulté de la démarche, puis une chute sur le sol, un décubitus, un pédalage. L'animal est en opistothonos, sue fortement, présente de l'écume à la commissure des lèvres, puis tout rentre dans l'ordre.

— La tétanie d'herbage. - Elle s'observe sur des animaux ayant passé l'hiver à l'intérieur et mis sur des pâturages luxuriant depuis une à deux semaines.

- La forme suraiguë se traduit par une mort subite.

- La forme aiguë débute par des troubles de comportement. L'animal se met à l'écart, est inquiet, présente des contractures, de l'hyperexcitation. La démarche devient vacillante, on observe des crises convulsives cloniques et toniques et du pédalage. La moindre excitation entraîne une crise. En l'absence

de traitement, la mort survient en 24 à 36 heures.

- La forme subaiguë est d'installation lente (3 à 4 jours). L'animal présente des spasmes, des contractions des muscles, surtout de la tête, puis les contractions deviennent plus violentes, les convulsions plus rares. L'évolution amène généralement une guérison.

- La forme chronique se traduit principalement par de l'hyperexcitabilité évoluant vers la guérison en quelques jours ou quelques semaines.

Les formes subaiguës et chroniques sont les plus graves (TOURNUT, 1978).

c) Potassium (K)

Les carences en K n'existent pratiquement pas, car les aliments en sont suffisamment pourvus. Elles se traduiraient par une faible croissance, de l'anémie et de la diarrhée (BLOOD et HENDERSON, 1976).

d) Chlorure de Sodium (NaCl)

L'emploi des pierres à lécher étant maintenant bien généralisé, les carences en chlorure de sodium sont rares. Dans certains cas particuliers, on observe chez les animaux carencés du pica, un appétit diminué, une perte de poids évidente. Ces symptômes s'observent environ un mois après le début de la carence.

Après une période plus longue, l'état général des animaux se détériore, le pelage devient sec, les yeux ternes. L'évolution se fait vers la mort si la carence n'est pas stoppée (BLOOD et HENDERSON, 1976).

3. Carences en oligo-éléments

a) Fer (Fe)

La carence en Fe ne s'observe que chez le jeune, car le lait est un aliment pauvre en cet élément.

On observe d'abord de l'anémie, un manque de vigueur, de l'inappétence et un arrêt de croissance. D'autre part, les jeunes animaux présentent

une moindre résistance aux infections (LAMAND, 1975).

b) Cuivre (Cu)

La carence en Cu donne lieu à de nombreuses manifestations cliniques non spécifiques. Cependant, le changement de coloration des poils noirs s'observe dans la majorité des cas. Dans les carences plus intenses, on décrit des diarrhées rebelles à tout traitement anti-infectieux (NIKPOUR et al., 1978).

Deux types de carence sont à considérer : carence primaire par insuffisance de Cu dans la ration et carence secondaire par excès de molybdène se combinant aux sulfates non organiques et ayant un rôle important dans l'absorption du Cu (BLOOD et HENDERSON, 1976).

Dans les deux cas, la carence se manifeste d'abord par de l'innapétence progressive, surtout pour les parties ligneuses de la ration. L'anémie s'observe principalement chez le jeune. Fréquemment, des boiteries bénignes sont remarquées avec des aplombs très défectueux chez le jeune ; on rencontre quelquefois une parésie, puis une paralysie du train postérieur qui correspond à une démyélinisation de la moelle épinière et du système nerveux central.

Dans certains élevages, des troubles cardiaques en série, du pica, des accidents congestifs peuvent faire penser également à une carence en Cu.

Lors de carence secondaire, il y a pratiquement toujours de la diarrhée (LAMAND, 1975).

c) Cobalt (Co)

Pour le Co comme pour les autres oligo-éléments, il n'existe pas de symptômes spécifiques de carence. Les animaux sont maigres avec un poil piqué. On peut également observer de l'anémie et de la diarrhée par déséquilibre de la flore intestinale dont le Co est un facteur essentiel de croissance (LAMAND, 1975).

d) Zinc (Zn)

La carence en zinc s'observe principalement chez le jeune. On l'observe peu de temps après le changement de régime. Il y a donc peu de mise en réserve de cet élément.

Outre l'inappétence et l'arrêt de croissance, c'est une affection qui touche l'épiderme, se caractérisant cliniquement par la prolifération de croûtes et le craquellement de la peau (BLOOD et HENDERSON, 1976). Ce sont des dermites sans prurit avec dépilation sans contours nets. Ces alopécies débutent le plus souvent au niveau de la tête et se continuent sur les membres (NIKPOUR et al., 1978). On peut également observer du larmoiement et un retard de cicatrisation des plaies (LAMAND, 1975).

e) Manganèse (Mn)

Les carences en Mn se traduisent par des troubles des appareils génital et locomoteur.

La puberté des animaux est retardée, la libido des mâles est diminuée, les femelles présentent des chaleurs discrètes.

Une insuffisance de Mn provoque un épaississement des tables articulaires et une disparition de l'angulation des jarrets : "jarret droit".

f) Sélénium (Se)

La carence en Se est caractérisée par la dégénérescence cireuse de Zancker des fibres musculaires. Différents muscles sont atteints et divers symptômes sont donc observés (LAMAND, 1975).

Lorsque l'affection atteint le muscle cardiaque, il peut y avoir mort brutale. Dans quelques cas, on peut entendre un coeur plus rapide et irrégulier. Si les muscles respiratoires sont touchés, on observe une dyspnée. Dans le cas des muscles du squelette, l'animal présente de la raideur, des tremblements des membres. Il a le dos voussé et garde les membres rassemblés en position de miction. Les anomalies sont toujours symétriques.

Les lésions des muscles atteints se présentent sous forme de zones blanches et grises ayant l'aspect de chair à poisson.

g) Iode (I)

Une carence en I est à suspecter dans les régions où existaient des goitres chez l'homme. Le principal signe de carence est l'existence d'un goitre que l'on peut voir et palper. Elle se manifeste également par de la mortalité et une alopécie symétrique.

Les principaux symptômes sont résumés dans le tableau A 12.

4. Diagnostic des carences

Le diagnostic des carences est parfois difficile, car les symptômes cliniques ne sont pas souvent pathognomoniques et les polycarences sont fréquentes.

Les principaux signes sont résumés dans le tableau A 12.

La méthode la plus fiable pour diagnostiquer une carence consiste en l'établissement d'un "profil minéral alimentaire". Cette méthode nécessite de très bien connaître l'état des animaux, leur capacité d'absorption, la formule des rations et la composition de leurs différents constituants. Des analyses alimentaires sont donc nécessaires.

Il est possible également de mettre en évidence des carences en éléments minéraux par leur dosage sur l'animal, mais la technique est délicate parce que les différents tissus et organes n'ont pas la même teneur en éléments, parce qu'il existe des réserves pour certains d'entre eux et des échanges constants entre certains compartiments de l'organisme.

Enfin, il faut prendre beaucoup de soins lors des prélèvements, surtout en ce qui concerne les oligo-éléments, pour éviter toute contamination exogène.

Les dosages peuvent porter sur :

- le plasma des animaux,
- le foie,
- les os, les poils,
- l'urine, la salive, le lait, le rein.

Le tableau A 13 résume les principaux prélèvements à effectuer pour chaque élément.

Tableau A 12 : Symptômes des carences en oligo-éléments chez les ruminants (d'après LAMAND, 1978)

| | Fe | | Cu | | Co | | I | | Mn | | Zn | | Se | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | J | A | J | A | J | A | J | A | J | A | J | A | J |
| Déficit de croissance ou d'engraissement | o | | o | o | o | o | o | | o | o | o | o | | |
| Chute de production de lait | | | o | | o | | | | | | o | | | |
| Inappétence | o | | o | o | o | o | o | o | | | o | o | | |
| Pica | | | o | o | o | o | | | | | | | | |
| Cachexie | | | o | o | X | X | | | | | o | o | | |
| Anémie | o | | o | o | o | o | | | | | | | | |
| Défaut d'aplomb | | | o | o | | | | | X | X | o | o | | |
| Fractures spontanées | | | o | o | | | | | | | | | | |
| Boiteries | | | o | o | | | | | o | o | o | o | o | |
| Troubles cardiaques | | | X | X | | | | | | | | | o | |
| Dyspnée | | | o | o | | | | | | | | | o | |
| Diarrhée | | | o | | o | o | | | | | | | | |
| Décoloration des poils | | | X | X | | | | | | | | | | |
| Poils piqués | | | o | o | X | X | o | | | | o | o | | |
| Pelade | | | | | | | o | | | | X | X | | |
| Dermites | | | | | | | | | | | X | X | | |
| Goitre | | | | | | | X | X | | | | | | |
| Infécondité | | | o | | o | | o | | o | | o | | | |
| Déformation des sabots | | | | | | | | | | | o | o | | |
| Dégénérescence musculaire | | | | | | | | | | | | | X | |

A = Adulte - J = Jeune - o = Symptôme courant - X = Symptômes les plus spécifiques

Tableau A 13 : Principaux prélèvements à effectuer pour la recherche des éléments

MACROELEMENTS (d'après WOLTER, 1975)

| | Sol | Ration | Plasma | Urine | Salive | Os |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ca | ++ | +++ | | | | ++ |
| P | ++ | +++ | ++ ($PO_4$) | | | |
| Cl | ++ | +++ | | | | |
| Na | ++ | +++ | | ++ | ++ | |
| K | ++ | +++ | | | ++ | |
| Mg | ++ | ++ | +++ | +++ | | |

OLIGO-ELEMENTS (d'après LAMAND, 1975)

| | (Clinique) | Aliments | Plasma | Diagnostic enzymatique | Foie | Poils |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe | ++ | ++ | ++ | | | |
| Cu | ± | ++ | ++ | +++ | ++ | + |
| Co ou vit. B 12 | ± | ++ | | | | |
| I | + | | | | | |
| Mn | ± | ++ | | | | |
| Zn | ± | ++ | ++ | | | + |
| Se | ++ | + | (SGOT) | +++ | | |

+++ Prélèvement très fiable
++ Prélèvement fiable
+ Prélèvement peu fiable

Tableau A 14 : Niveaux d'approvisionnement (valeurs sériques) et besoins en macroéléments chez les bovins en croissance (d'après ZINTZEN, 1972)

| | Veaux de 50 à 100 kg | Veaux de 200 kg (élevage) | Boeufs de 400 kg (engrais) |
|---|---|---|---|
| Taux sériques (mg/100 ml) | | | |
| P | 8,9 ± 0,6 | 8,1 ± 1,0 | 7,1 ± 1,0 |
| Mg | 1,6 - 3,83 | - | - |
| Na | - | 390 (290 - 375) | - |
| K | - | 18 - 25 | - |
| Cl | - | 360 (340 - 400) | - |
| Besoins en % de l'aliment (MS) | | | |
| P | 0,22 | 0,20 | 0,20 |
| Ca | 0,4 - 0,3 | 0,4 - 0,3 | 0,4 - 0,3 |
| Mg | 0,13 - 0,2 | 0,20 | - |
| Na | - | 0,20 - 0,25 | - |
| K | - | 2,0 - 3,5 | - |

Tableau 15 : Niveaux d'approvisionnement et besoins en oligo-éléments chez les bovins (d'après ZINTZEN, 1972)

| | Niveau normal | Carence | Intoxication |
|---|---|---|---|
| **IODE** | | | |
| Teneur du plasma sanguin (forme liée au protéines) (mcg/100 ml) | 12,2-20,3* 6,76** | < 2,5 | |
| Teneur totale de la thyroïde (MS) ppm | 1 330-5 000 | <1 200 | |
| ppm de la thyroïde (g) | 2,4-6,5 | 5,4-186 | |
| Teneur de l'aliment (MS) ppm | 0,03-0,06 | < 0,03 | |
| Besoins de l'aliment (MS) ppm | 0,1-0,5 1,2*** | | |
| **COBALT** Teneur du sérum sanguin (mcg/100 ml) | 0,35-0,4 | | |
| Teneur du foie (MS) ppm | 0,08-0,3 | <0,08 | 228 |
| Teneur des poils pigmentés (MS) ppm | > 0,05 | <0,05 | |
| Teneur de la liqueur du rumen (mcg/litre) | > 20 | < 20 | |
| Besoins en ppm de l'aliment (MS) | 0,08-0,11 | <0,04 | > 30 |
| **SELENIUM** Teneur du sang ppm | 0,1-0,2 | 0,01-0,02 | 1-25 |
| Teneur du foie ppm | 0,2-0,8 | 0,2 (veaux) | 4-25 |
| Teneur des poils ppm | 1-4 | 0,06-0,23 | > 10 |
| Activité de la SGOT (EI/ml) | 20-100 | 300-5 000 | |
| Besoins de l'aliment (MS) ppm | 0,1-0,5 | < 0,08 | >10 |

* nouveau-nés ; ** veaux plus âgés ; *** si substances strumigènes

Tableau A 15 (suite)

| | Carence possible | Carence certaine | Valeur normale | Intoxication |
|---|---|---|---|---|
| **CUIVRE** | | | | |
| Teneur du sang (mg/100 ml) | 0,05 | 0,01-0,02 | 0,07-0,17 | 300-1 100 |
| Teneur du foie (MS) ppm | 12 | 1-5 | >100-200* | 800-3 500 |
| Teneur du poil pigmenté (MS) ppm | 5,5 | 1,8-3,4 | 6,6-10,4 | |
| Teneur en Cu-Mo de l'aliment (MS) ppm | 5-10 Cu<br>5-10 Mo | >10 Mo<br>3-5 Cu | > 10 Cu<br>>5-2 Mo | |
| Besoins en ppm de l'aliment (MS) | < 5[b]<br><2-3[a] | | 7,5[a]<br>8-12[b] | 115<br>50-80** |
| Concentration dans le sel (mg/100 g) | | | 2-5 | |

a : foin ; b : herbe fraîche ; * minimum 300 pour les nouveau-nés
** : chez le jeune

| | Niveau normal | Carence | Intoxication |
|---|---|---|---|
| **MANGANESE** | | | |
| Teneur du sang (mcg/100 ml) | 2,2-2,78 | <1,8 | |
| Teneur du sérum (mcg/100 ml) | 1,6-1,0 | | |
| Teneur du sang (MS) ppm | 0,25-0,40 | 0,16-0,25 | |
| Teneur du foie (MS) ppm | 8* | 6-10 | |
| Teneur des os (MS) ppm | 1,5-3,2 | 1,0-1,4 | |
| Teneur des poils pigmentés (MS) ppm | 3-5* | < 3-5 | |
| Besoins en ppm de l'aliment (MS) | 40**<br>30*** | <10 | >600-1 000 |

* nouveau-nés ; ** jeunes bovins ; *** bovins à l'engrais

Tableau A 15 (suite)

| | Niveau normal | Carence | Intoxication |
|---|---|---|---|
| **ZINC** | | | |
| Teneur du sang (mg/100 ml) | 0,122-0,284 | 0,13-0,28 | |
| Teneur du plasma (mg/100 ml) | 0,08-0,12 | 0,06 | |
| Teneur du foie (MS) ppm | 125-170 | 100-115 | > 500 |
| Teneur du pancréas (MS) ppm | 160-170 | 60-70 | |
| Teneur des os (MS) ppm | 90-105 | 60-80 | |
| Teneur des fèces (MS) ppm | | 15-20 | |
| Besoins ppm de l'aliment (MS) | 30 | | >500-1 000* |

* 80 peut entraîner une carence en Cu

Tableau A 16 : Niveaux d'approvisionnement en fer, molybdène et fluor chez les bovins (d'après ZINTZEN, 1972)

| | Fer | Molybdène | Fluor |
|---|---|---|---|
| Besoins en ppm de l'aliment (MS) | 50-80* (1)<br>20-30** (1) | | |
| Valeur normale à l'hématocrite (en %) | 34-38* | | |
| Carence (%) | 20-30* | | |
| Intoxication (%) | | 17 | |
| Valeur normale du taux d'hémoglobine (g/100 ml) | 10-13* | | |
| Carence (g/100 ml) | 4-10* | | |
| Intoxication (g/100 ml) | | 5-6 | |
| Valeur normale du taux sérique (mg/100 ml) | 0,20-0,28* | | |
| Carence (mg/100 ml) | 0,05-0,10* | | |
| Niveau de tolérance ppm | 770-1 800 (aliment)<br>200 (eau) | (5 ppm Cu dans MS de l'aliment)<br>0,1-0,7 ds sang<br>2-5 ds foie<br>0,3-1 ds poils<br>5-10 ds MS aliment | >20-40 aliment (MS) (2) (3)<br>>50-100 aliment (MS) (2) (4)<br>5-10 eau |
| Niveaux toxiques ppm | 4 400 (alim. MS) | Si CU normal :<br>0,7 (sang)<br>5 (foie)<br>1 (poils)<br>10 (MS alim.) | 10 (urine) (5)<br>5 000 (os et cendres)<br>40 (MS alim.)<br>10 (eau) |

* Veaux ; ** Bovins engrais

(1) Selon la disponibilité du fer

(2) Avec un approvisionnement optimal en Ca-P, les considérations en F qui seraient normalement critiques sont tolérées plus longtemps sans danger

(3) Na F ; Na2SiF6

(4) Na3AlF6 ; Ca5 ($PO_4$) 3F

(5) Poids spécifique 1,030

## III - Toxicité des minéraux chez les bovins en croissance

### 1. Seuils de toxicité

Les toxicités en minéraux résultent le plus souvent d'erreurs nutritionnelles. On les rencontre principalement avec Cu, Mo, Se.

Les seuils de toxicité sont évalués ainsi :

Tableau A 17 : Seuils de toxicité des oligo-éléments en mg/kg MS (LAMAND, 1975)

| Cu | Co | I | Mn | Zn | Se | Mo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 100 | 8 | 1 000 | 500 | 0,5 | 3 |

Il faut noter que Cu et Mo sont très liés et interfèrent, le Mo rendant le Cu inutilisable. Le seuil de toxicité du Cu est donc abaissé lorsque le taux de Mo diminue.

Les valeurs maximum en macro-éléments sont difficiles à évaluer. Des troubles par excès de K et Mg ne sont jamais observés. Les intoxications en NaCl sont accidentelles. La dose toxique est évaluée à 2,2 g/kg PV (BLOOD et HENDERSON, 1976).

### 2. Signes de toxicité

#### a) Chlorure de sodium (NaCl)

Une intoxication au NaCl est exceptionnelle. Elle est plus grave lorsque l'apport d'eau a été réduit.

Elle se traduit par des signes nerveux causés par un oedème cérébral. Parallèlement, nous observons des signes digestifs d'inflammation.

L'animal présente de l'anorexie, des douleurs abdominales et du mucus dans les fèces. Il y a toujours de la polyurie. L'animal reste ensuite en décubitus et la mort survient 24 heures après le début des symptômes (BLOOD et HENDERSON, 1976).

b) Le soufre (S)

Les intoxications au S sont dues à des surdosages. L'animal est abattu ; on remarque une douleur abdominale, des trémulations musculaires ainsi qu'une déshydratation de plus en plus marquée. Une odeur d'$H_2S$ du souffle de l'animal est caractéristique. L'animal meurt dans le coma.

c) Cuivre (Cu)

On peut observer des intoxications aiguës ou chroniques par le Cu.

L'intoxication aiguë survient après une absorption accidentelle ou une injection mal dosée. Elle se traduit par une gastro-entérite avec douleur abdominale et des fèces vertes ou bleues. L'animal meurt après un état de choc.

L'intoxication chronique comporte deux phases : accumulation puis toxicité.

L'accumulation se fait passivement dans les tissus et d'abord le foie, alors qu'aucun symptôme n'est extériorisé. Puis survient la phase toxique qui est une maladie aiguë fréquemment rapportée à une "crise hémolytique" pouvant causer la mort en quelques heures, mais le plus souvent en 2 à 4 jours. On observe sur l'animal un ictère hémolytique et des urines brun foncé (AMMERMAN, 1970).

d) Molybdène (Mo)

De par son interférence avec Cu, une intoxication par Mo se traduit par une carence en Cu, avec diarrhée persistante, dépigmentation du poil et arrêt de croissance.

e) Sélénium (Se)

L'intoxication par Se pourrait être fréquente si la législation française n'avait pas fixé de taux maximum d'incorporation dans les aliments. Le seuil de toxicité est en effet très bas : 5 mg/kg MS. La législation ne tolère que 0,5 mg/kg MS.

Cette intoxication se traduit par des troubles des phanères : chute des poils, fendillement des cornes. On peut également observer des signes d'atteinte nerveuse : cécité, boiterie. L'animal meurt, paralysé, d'une syncope respiratoire (LAMAND, 1975).

Tableau A 18 : Apports de calcium et de phosphore recommandés pour les bovins en croissance (d'après GUEGUEN, 1978)

| Poids vif (kg) | Gain de poids journalier (g/j) | Apports journaliers recommandés (g/j) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ca (CUDr) | Ca (g/j) | P (CUDr) | P (g/j) |
| 100 | 500 | 70 | 13 | 80 | 8 |
| | 700 | | 17 | | 10 |
| | 1 000 | | 24 | | 13 |
| | 1 200 | | 28 | | 16 |
| | 1 400 | | 33 | | 18 |
| 200 | 500 | 55 | 18 | 75 | 11 |
| | 700 | | 23 | | 13 |
| | 1 000 | | 30 | | 16 |
| | 1 200 | | 35 | | 18 |
| | 1 400 | | 40 | | 20 |
| 300 | 0 | 50 | 11 | 65 | 12 |
| | 300 | | 20 | | 15 |
| | 500 | | 24 | | 17 |
| | 700 | | 29 | | 19 |
| | 1 000 | | 37 | | 22 |
| | 1 200 | | 42 | | 25 |
| | 1 400 | | 47 | | 28 |
| 400 | 0 | 45 | 16 | 55 | 18 |
| | 300 | | 25 | | 21 |
| | 500 | | 30 | | 24 |
| | 700 | | 36 | | 27 |
| | 1 000 | | 45 | | 31 |
| | 1 200 | | 50 | | 34 |
| | 1 400 | | 56 | | 36 |
| 500 | 0 | 40 | 22 | 55 | 23 |
| | 300 | | 33 | | 26 |
| | 500 | | 39 | | 29 |
| | 700 | | 46 | | 31 |
| | 1 000 | | 55 | | 35 |
| | 1 200 | | 61 | | 38 |
| | 1 400 | | 68 | | 40 |
| 600 | 0 | 35 | 31 | 55 | 27 |
| | 300 | | 40 | | 30 |
| | 500 | | 45 | | 32 |
| | 700 | | 51 | | 34 |
| | 1 000 | | 59 | | 36 |
| | 1 200 | | 65 | | 39 |
| | 1 400 | | 66 | | 39 |

Tableau A 19 : Apports de magnésium recommandés pour les bovins en croissance (d'après GUEGUEN, 1978)

| Poids vif (kg) | Gain de poids (g/j/animal) et recommandations | | |
|---|---|---|---|
| | 300 à 700 g | 700 à 1 000 g | 1 000 à 1 400 g |
| 100 | 1,0 | 1,3 | 1,7 |
| 200 | 2,0 | 2,4 | 2,9 |
| 300 | 3,6 | 4,2 | 4,8 |
| 400 | 5,0 | 6,2 | 7,0 |
| 500 | 6,5 | 7,4 | 8,2 |
| 600 | 7,5 | 8,5 | 9,5 |

Tableau A 20 : Apports de potassium, sodium et chlore recommandés pour les bovins en croissance (d'après GUEGUEN, 1978)

| Poids vif (kg) | Potassium (g/j/animal) | Sodium (g/j/animal) | Chlore (g/j/animal) |
|---|---|---|---|
| 100 | 8 | 3,5 | 3,5 |
| 200 | 14 | 6,0 | 6,0 |
| 300 | 20 | 8,5 | 8,5 |
| 400 | 26 | 11,0 | 11,0 |
| 500 | 32 | 14,0 | 14,0 |
| 600 | 38 | 18,0 | 18,0 |

Tableau A 21 : Limites de carences, apports recommandés et seuils de toxicité des oligo-éléments par kg MS (d'après LAMAND, 1978)

| Eléments | Limites de carences en ppm (mg/kg) | Apports recommandés (ppm ou mg/kg/j) | | Seuils de toxicité (ppm) |
|---|---|---|---|---|
| | | Ration classique | Ensilage maïs + urée | |
| Cuivre | 7,00 | 10,0 | 14,0 | 100,0 |
| Cobalt | 0,07 | 0,1 | 0,1 | 100,0 |
| Iode | 0,15 | { 0,2<br>{ 0,8 | 0,2 | 8,0 |
| Manganèse | 45,00 | 50,0 | 120,0 | 1 000,0 |
| Zinc | 45,00 | 50,0 | 75,0 | 500,0 |
| Sélénium | 0,10 | 0,1 | 0,1 | 0,5 |
| Molybdène | | | | 3,0 |

Tableau A 22 : Comparaison des apports et des besoins en oligo-éléments chez le jeune (d'après LAMAND, 1978)

| Eléments | Apports par le lait de vache (ppm ou mg/kg MS)* | Besoins du veau (ppm ou mg/kg MS) |
|---|---|---|
| Fer | 1,50 à 3,80 | 15 |
| Cuivre | 0,15 à 1,15 | 5 à 10 |
| Zinc | 15 à 38 | 50 |
| Manganèse | 0,20 à 0,40 | 50 |
| Sélénium | 0,08 à 0,40 | 0,10 |
| Iode | 0,10 à 0,20 | 0,12 |
| Chrome ? | 0,08 à 0,15 | 2 |

* Les teneurs sont calculées en supposant une teneur de 130 g de MS par litre de lait

## B - LES COMPLEMENTS MINERAUX : LEUR FABRICATION

### I - Les matières premières

#### 1. Les phosphates

Le phosphate est l'élément le plus important dans les compléments minéraux des bovins, car ces matières premières sont très onéreuses et de qualité très variable, surtout quant à leur assimilation.

##### a) Origine des phosphates

On distingue 3 grandes sources pour obtenir du phosphate :

— Origine végétale : La concentration en P des végétaux est faible et la digestibilité mauvaise. D'autre part, ce P se présente principalement sous forme phytique bien transformée chez les ruminants uniquement.

— Origine animale : Dans les farines (viandes, poissons) ou à partir des os (phosphate bicalcique précipité d'os). Le P se trouve sous une forme très assimilable à côté d'autres éléments minéraux qui constituent des sources non négligeables d'apport minéral.

— Origine minérale : Il s'agit alors de phosphates provenant de gisements naturels et ayant subi des traitements divers. Ces minerais contiennent des taux de P très variables ainsi que des impuretés plus ou moins utiles.

En ce qui concerne les phosphates naturels, trois grands fournisseurs étaient présents sur le marché en 1977 : le Maroc, le Togo et l'Algérie. Sont également présents les Etats-Unis, la Tunisie et le Sénégal.

En 1973, la production mondiale de phosphates était estimée à 100 millions de tonnes dont 40 millions pour les Etats-Unis, 22 millions pour l'Union Soviétique et 17 millions pour le Maroc. Mais le Maroc est le premier exportateur et possèderait la moitié des réserves estimées à 150 milliards de tonnes.

Ces phosphates marocains sont extraits principalement autour des villes de Yousoufia et Khouribga.

b) Différents types de phosphates

Les phosphates peuvent être classés selon plusieurs critères, d'après :

- leur origine,
- leur taux de P,
- leur composition,
- l'assimilation de leur P,
- leur solubilité dans l'eau,
- leur solubilité dans l'acide citrique à 2 %.

D'une manière générale, tous les phosphates solubles dans l'eau sont bien assimilés par les animaux, le CUDr du P étant, dans les conditions normales, supérieurà 60 %. Il s'agit de l'acide phosphorique, des orthophosphates, du phosphate monocalcique, des pyrophosphates et tripolyphosphates sodiques et ammoniaqués.

Il existe également des phosphates insolubles dans l'eau bien assimilés. C'est le cas pour le phosphate monocalcique, le phosphate triple de Ca, Na et Mg, le phosphate bicalcique anhydre et le phosphate bicalcique hydraté. Pour ces derniers, le CUDr du P est de 60-70 % (GUEGUEN, 1970).

On établit maintenant la valeur d'un phosphate en fonction du pourcentage de phosphore extrait de ce phosphate par l'acide citrique à 2 %. Cette méthode a l'avantage de donner des résultats en plein accord avec le CUDr obtenu sur les animaux.

Nous pouvons donc dresser la liste des principaux phosphates utilisés en fonction de leur CUDr dans les tableaux B 1 et B 2.

La purification des minerais se fait par différents traitements que nous décrirons dans le chapitre suivant. La défluorisation se fait par traitement thermique qui dénature certaines formes assimilables du P. Ce traitement provoque en effet une polymérisation de l'orthophosphate aboutissant à des matéphosphates ou pyrophosphates qui sont difficilement utilisables et que l'on classe dans le bas de l'échelle des qualités.

Tableau B 1 : Sources de phosphore solubles dans l'eau (GUEGUEN, 1973)

| Sources | Formule | P (%) | CUDr moyen de P (%) (adultes) | Autres éléments (%) |
|---|---|---|---|---|
| Acide phosphorique | $PO_4H_3$ | 31,6 | 80 | - |
| Ph. monosodique hydraté | $PO_4H_2Na,2H_2O$ | 20,0 | 70-80 | 16 Na |
| Ph. monosodique anhydre | $PO_4H_2Na$ | 25,5 | 70 | 19 Na |
| Ph. disodique hydraté | $PO_4HNa_2,12H_2O$ | 9,0 | 70-80 | 13 Na |
| Ph. disodique anhydre | $PO_4HNa_2$ | 21,8 | 70-75 | 32 Na |
| Ph. monopotassique | $PO_4H_2K$ | 22,8 | 70-80 | 28 K |
| Ph. dipotassique | $PO_4HK_2$ | 17,8 | 70-80 | 44 K |
| Ph. monoammonique | $PO_4H_2NH_4$ | 27,0 | 70-80 | 12 N |
| Ph. diammonique | $PO_4H(NH_4)_2$ | 23,0 | 70-80 | 21 N |
| Ph. monocalcique | $(PO_4)_2H_4Ca,H_2O$ | 22-24 | 60-70 | 15-19 Ca |
| Tripolyphosphate sodique | $P_3O_{10}Na_5$ | 25,0 | 60-70 | 31 Na |
| Pyrophosphate sodique | $P_2O_7Na_4$ | 23,0 | 60-70 | 34 Na |
| Tripolyphosphate ammonique | $P_3O_{10}(NH_4)_5$ | 27,0 | 60-70 | 20 N |
| Pyrophosphate ammonique | $P_2O_7(NH_4)_4$ | 25,0 | 60-70 | 22 N |

Tableau B 2 : Sources de phosphore peu solubles ou insolubles dans l'eau (d'après GUEGUEN, 1973)

| Sources | Formule | P (%) | % de 250 mg de P extrait à ac. citr. 2 % | CUDr P (%) adulte | Autres éléments (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Ph. mono-bicalcique | (Mélange) | 20,0 | 100 | 60-70 | 20 Ca |
| Ph. triple Na, Ca, Mg | (Mélange) | 17,0 | 100 | 60-70 | 12 Na, 9 Ca, 5 Mg |
| Ph. bicalcique hydraté (minéral ou précipité d'os) | $PO_4HCa,2H_2O$ | 17,5 | 90-95 | 60-65 | 23-24 Ca |
| Ph. bicalcique anhydre | $PO_4HCa$ | 22,0 | 90-95 | 60 ou< | 29 Ca |
| Silicophosphate de Ca et Na | | 18,0 | 80 | 50-60 | 32 Ca, 5 Na |
| Ph. tricalcique d'os | $(PO_4)_3Ca_5(OH)$ | 13-15 | 50-60 | 50-55 | 27-33 Ca |
| Ph. tricalcique pur | $(PO_4)_2Ca_3$ | 20,0 | 70 | 50-60 | 38 Ca |
| Farine de viande osseuse | | 6-8 | 50-60 | 50-55 | 12-16 Ca |
| Ph. tricalcique naturel | $(PO_4)_2Ca_3CaK$ | 10-17 | 20-60 | 20-50 | 20-34 Ca |
| Métaphosphate de calcium | $(PO_3)_{2n}Ca_n$ | 20,0 | 20-30 | 40-50 | 13 Ca |
| Ph. alumine-ferro-calcique | | 15,0 | 10 | < 20 | 19 Al, 6 Fe, 7 Ca |
| Pyrophosphate de calcium | $P_2O_7Ca_2$ | 24,0 | 10 | < 20 | 31 Ca |

Tableau B 3 : Composition de quelques minerais livrés à l'A.P.C. à Grand-Couronne en 1976 (d'après l'A.P.C., 1977)

| | ex-Maroc 75 PBL | ex-Maroc 72 PBL | ex-Floride 73 PBL | ex-Conda | ex-Togo | ex-Taiba | Commentaires par rapport aux valeurs contrats |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_2O_5$ (%) | 53,90 | 50,80 | 51,20 | 51,00 | 49,80 | 52,20 | Dépend de l'A.P.C. |
| F (%) | 0,73 | 1,00 | 1,22 | 0,98 | 0,88 | 0,08 | Bon |
| $\frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3}{P_2O_5}$ (%) | 0,01 | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | Bon |
| Cl (ppm) | 40,00 | 38,00 | 22,00 | - | - | - | Bon |
| MgO (%) | 0,40 | 0,52 | 0,25 | 0,58 | 0,10 | 0,30 | Bon |
| M. E. S. (%) (matière en suspension) | 2,50 (?) | 0,60 | - | 0,76 | 0,40 | 2,50(?) | Dépend de l'A.P.C. |

D'autre part, les fabricants d'aliments recherchent des matières premières correspondant à certains désirs pratiques :

- régularité de l'approvisionnement,
- facilité de réception,
- facilité de stockage,
- facilité de transfert en usine,
- éviter les poussières, les prises en masse, les démélanges...

Pour cela, il faut une densité correcte, évitant de trop gros frais au quintal (transport, stockage). Cette densité ne doit pas non plus être trop élevée pour éviter les prises en masse et les difficultés de transfert. Certains phosphates ont une densité de 0,8, d'autres plus lourds font 2 à 2,2.

Il faut également une solubilité dans l'eau n'entraînant pas ce phénomène de prise en masse (c'est l'inconvénient du phosphate monocalcique qui est très hygroscopique s'il n'est pas en perle).

La présentation du phosphate doit également être adaptée aux différents produits fabriqués. En France, les phosphates en poudre ne semblent pas poser de problème de manutention ni de stockage. Par contre, les phosphates en semoulette, utilisés dans les produits en poudre (prémixes minéraux, aliments complets) doivent être broyés, d'où des frais supplémentaires. Mais les semoulettes sont intéressante car elles contiennent un minimum d'humidité libre.

Il existe également des contraintes techniques.

L'appétence : Pour certains, un phosphate acide est plus appétent qu'un neutre ou un basique. Par ordre d'appétence décroissant, nous aurions : phosphate monocalcique (PH 4-5), phosphate monobicalcique (PH 4,5), phosphate bicalcique (PH 7) et phosphate de sodium (PH supérieur à 7).

Au point de vue de la formulation, le fabricant peut introduire des contraintes de quantité maximum de phosphates qui tiennent compte de la couleur du produit, de la densité, l'appétence, le passage à la presse, la tenue du granulé... Il peut enfin exiger des qualités déterminées en fonction de la solubilité dans l'acide citrique à 2 % par exemple.

d) Traitement des phosphates bruts

— Phosphates d'origine animale

Les os sont dégraissés, broyés et tamisés. Les lots de fragments constitués sont soumis à une attaque chlorhydrique (40-50 g HCl/l) pendant 2 jours pour les petits calibres, jusqu'à 5 jours pour les plus gros. On sépare ainsi le phosphate tricalcique en solution de l'osséine qui servira à la fabrication de gélatine.

Mise en présence de lait de chaux, la solution de phosphate monocalcique est précipitée dans des conditions de pH très précises, permettant d'obtenir du phosphate bicalcique.

Ce précipité est ensuite lavé, essoré, séché pendant 10-15 minutes à 500°C et à humidité constante.

— Phosphates d'origine minérale

La transformation des phosphates minéraux peut se faire par un stade intermédiaire d'acide phorphorique ou par une attaque chlorhydrique.

La première méthode consiste à mettre en présence de l'acide sulfurique et le phosphate brut. On obtient ainsi du gypse et de l'acide phosphorique impur. Cet acide phosphorique impur en solution est ensuite neutralisé et séché.

La deuxième méthode se fait à partir de l'acide chlorhydrique (HCl) (exemple d'un phosphate Maroc 33,5) : Figure B 1.

Le minerai est broyé, puis subit une attaque par HCl. Le produit obtenu contient une boue et un liquide contenant le P. Ce mélange est ensuite filtré puis neutralisé par la chaux donnant un phosphate chaulé.

La chaux est obtenue à partir de la craie. Une tonne de phosphate bicalcique à 18 % de P nécessite 640 kg de craie et 1,95 tonne de HCl sur du phosphate Maroc 70, 1,85 tonne de HCl pour du Maroc 75, soit un gain de 75 %.

HCl est produit à partir du sulfate de potassium $K_2SO_4$. Une tonne de HCl (20° Bé) est produite à partir de 0,82 tonne de $K_2SO_4$ et permet la production de 512 kg de phosphate bicalcique à 18 % de P.

Etudions maintenant le procédé de fabrication.

2. Autres sources de macro-éléments

Les phosphates apportent d'autres éléments que le P, tels que Ca, Na, Mg et même K (voir tableau B 1).

Les phosphates disodiques anhydres apportent 32 % de Na, les phosphates tricalciques environ 30 % de Ca, les phosphates dipotassiques 44 % de K. Ces sources ne sont pas à négliger.

a) Calcium (Ca)

L'efficacité nutritionnelle du Ca des phosphates varie dans le même sens que celle du P. Cependant, le CUDr du Ca est plus faible que celui du P (20 à 50 % en moyenne).

Le carbonate de Ca constitué de calcaires broyés (38-40 % Ca) de maërl (algues calcifiées), de coquillages marins (30-35 % Ca) est généralement bien utilisé.

Les sels de Ca organiques sont également bien utilisés et d'autant plus que l'on utilise les formiate, acétate, tartrate, fumarate et lactate (GUNTHER, 1969).

Le calcaire dolomitique est moins bien utilisé, de même que le sulfate de Ca, qui a cependant l'avantage d'apporter du S dans certains régimes.

En ce qui concerne les impuretés, notamment pour le carbonate de Ca, il faut exiger moins de 5 % d'insoluble chlorhydrique (y compris la silice) (GUEGUEN, 1970).

b) Magnésium (Mg)

L'efficacité biologique du Mg des différentes sources : carbonate (28 % Mg), sulfate (10-17 % Mg), oxyde (calcinée : 60 % Mg ou hydratée : 40 % Mg) et chlorure (12 % Mg) serait à peu près identique à 50-55 %.

Le sulfate de Mg apporte du soufre qui peut être intéressant dans certains régimes, mais l'excrétion urinaire est trop importante comme pour le Ca (GUEGUEN, 1970).

Figure B 1 : Schéma du traitement des minerais de phosphates par l'acide chlorhydrique (d'après l'A.P.C., 1977)

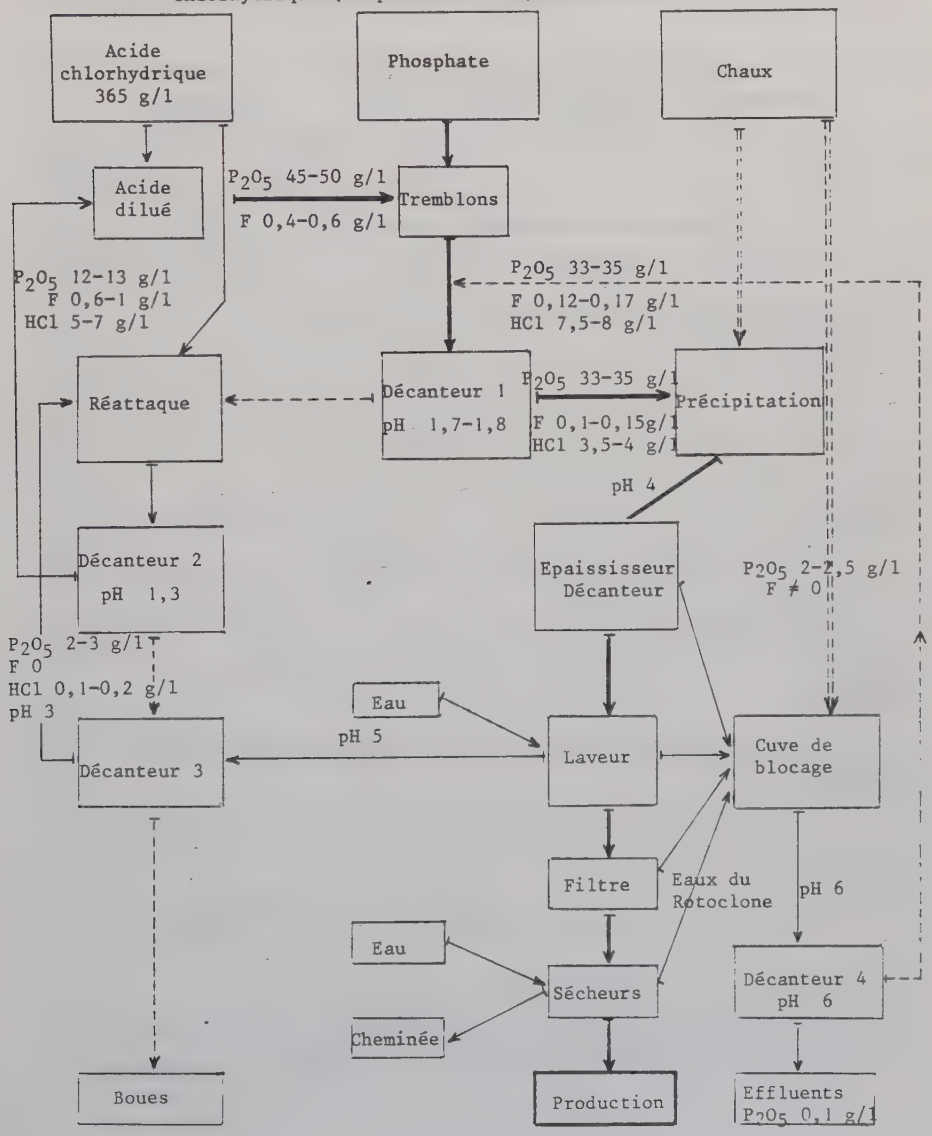


Tableau B 4 : Quelques sources spécifiques de calcium (d'après GALLOT, 1977)

| Nom et formule | % de Ca | Autres minéraux (%) | Remarques |
|---|---|---|---|
| Carbonate de Ca $CaCO_3$ | 40,0 | $CO_3$ : 59,95 | Emploi très fréquent |
| Sulfate de Ca $CaSO_4$ | 29,0 | $SO_4$ : 70,75 | Augmente l'élimination urinaire de P et Ca |
| Chlorure de Ca $CaCl_2$ | 36,1 | Cl : 63,90 | Goût amer |
| Phosphates calciques | Cf. Tableaux B 1 et B 2 | | |
| Citrate de Ca $Ca_3(C_6H_5O_7)_2,4H_2O$ | 21,0 | | Très assimilable |
| Gluconate de Ca $Ca(C_5H_{11}O_5COO)_2,H_2O$ | 8,9 | | " |
| Formiate de Ca $Ca(HCOO)_2$ | 30,8 | | " |
| Lactate de Ca $Ca(CH_3CHOHCOO)_2,5H_2O$ | 13,0 | | " |
| Acétate de Ca $Ca(CH_3COO)_2$ | 25,2 | | " |

Tableau B 5 : Les sources spécifiques de magnésium (GALLOT, 1977)

| Nom et formule | % Mg | Autres minéraux (%) | Remarques |
|---|---|---|---|
| Oxyde de Mg<br>MgO | 60 | | Bonne absorption |
| Hydroxyde de Mg<br>$Mg(OH)_2$ | 40 | | Dolomie : 40 % |
| Carbonate de Mg<br>$MgCO_3$ | 29 | $CO_3$ : 71,0 | Maërl : 15 %<br>Os : 10 %<br>Dolomie : 40 % |
| Chlorure de Mg<br>$MgCl_2,6H_2O$ | 12 | Cl : 35,0 | Amer - Laxatif |
| Sulfate de Mg<br>$MgSO_4$ | 20 | $SO_4$ : 79,8 | Utilisation de Ca P |
| Sulfate de Mg hydraté<br>$MgSO_4,7H_2O$ | 10 | $SO_4$ : 39,0 | Utilisation de Ca P |
| Citrate de Mg<br>$Mg_3(C_6H_5O_7)_2,14H_2O$ | 10,4 | | |
| Gluconate de Mg<br>$Mg(C_5H_{11}O_5COO)_2$ | 5,9 | | |
| Lactate de Mg<br>$Mg(CH_3CHOHCOO)_2,3H_2O$ | 9,5 | | |

Le Mg du calcaire dolomitique est moins bien utilisé que le Mg de l'oxyde. D'autre part, l'absorption et la rétention de Ca est moins importante lorsque l'on supplémente avec du calcaire dolomitique. Il diminue de

même la digestibilité des glucides et l'énergie de la ration (GERKEN et al., 1967).

c) Sodium (Na)

Le chlorure de sodium (NaCl) est habituellement la source de Na, mais le Cl n'est jamais un facteur limitant dans les aliments, on peut donc apporter du Na sans le chlore.

Les phosphates peuvent en apporter une certaine part.

Le bicarbonate de soude peut également en apporter une faible part.

La source la plus pratique d'emploi et la plus économique est certainement le sel sous forme de pierre à lécher puisque le NaCl contient 30-35 % de Na. Ce peut être du sel gemme à l'état brut ou du sel marin. L'eau de mer contient 30 g NaCl/l.

Il faut évaporer 30 litres d'eau pour obtenir 1 kg de sel. L'évaporation se fait en faisant circuler l'eau sur de grandes surfaces à faible épaisseur puis le sel se dépose sur des tables salantes.

Les principaux lieux de productions français se situent sur la côte méditerranéenne dans le Gard et les Bouches-du-Rhône où les Salines d'Aigues-Mortes et de Giraud peuvent produire jusqu'à 1,5 million de tonnes de sel par an.

Tableau B 6 : Les sources spécifiques de sodium (d'après GALLOT, 1977)

| Nom | Formule | % Na | Autres minéraux (%) |
|---|---|---|---|
| Chlorure de Na | NaCl | 39,3 | Cl : 60,7 |
| Bicarbonate de Na | $NaHCO_3$ | 27,3 | $HCO_3$ : 72,6 |
| Sulfate de Na | $Na_2SO_4$ | 32,4 | $SO_4$ : 67,6 |
| Phosphates sodiques | Cf. Phosphates tableaux B 1 et B 2 | | |

d) Soufre (S)

L'incorporation de S dans l'alimentation des animaux a été rendue nécessaire par l'emploi de l'ensilage maïs supplémenté en azote non protéique. Ce S a pour but de favoriser la synthèse d'acides aminés soufrés par les micro-organismes du rumen.

La forme la plus simple est le soufre élémentaire ou fleur de soufre. Son efficacité est bonne, mais moindre que celle du sulfate de Na.

L'emploi du sulfate de Na aurait également l'avantage de favoriser la formation d'acide propionique aux dépens de l'acide acétique. Mais un excès de sulfites ou sulfates a une action néfaste sur le métabolisme phosphocalcique (GUEGUEN, 1970).

Tableau B 7 : Les sources de soufre (d'après GALLOT, 1977)

| Nom et formule | % S | Autres minéraux (%) | Remarques |
|---|---|---|---|
| Soufre élémentaire | 100,0 | | Utilisation inférieure aux sulfates |
| Sulfates $MgSO_4$ | 26,6 | Mg : 21,2 | Diminue l'utilisation de Ca et P |
| $K_2SO_4$ | 18,4 | K : 44,9 | |
| $CaSO_4$ | 23,5 | Ca : 29,4 | Augmente l'excrétion urinaire de Ca etP |
| $NaSO_4$ | 22,6 | Na : 32,4 | |
| Sulfite de Na $Na_2S,9H_2O$ | 13,4 | Na : 19,2 | |

3. Sources d'oligo-éléments

a) Fer (Fe)

Un apport supplémentaire de fer est rarement nécessaire chez les bovins, surtout s'ils reçoivent du fourrage et des céréales.

Le sulfate ferreux est une bonne source. Il est obtenu par décapage de tôles à l'acide sulfurique et retraité ensuite à l'antimottant pour éviter les reprises en masse. Il se présente sous la forme d'une poudre vert clair.

Sont également de bonnes sources les citrate, gluconate, fumarate et tartrate ferreux, ainsi que les chlorures.

Le fer réduit et le pyrophosphate ferrique sont médiocres.

L'oxyde ferrique, le carbonate ferreux et l'orthophosphate ferrique sont des sources très peu utilisables (FRITZ, 1969).

b) Cuivre (Cu)

Les sulfate (25 % Cu), carbonate (53 %), chlorure (37 %), donnent des résultats équivalents et sont de bonnes sources.

L'oxyde cuivrique (80 % Cu) est moins bon.

Le sulfure est très mal employé (CHAPMAN et al., 1963).

Certaines formes organiques comme l'acétate cuivrique seraient mieux absorbées que les formes minérales (LAMAND, 1978).

Le sulfate est obtenu à partir du Cu métal par attaque à l'acide sulfurique et ensuite traité à l'antimottant. Il se présente comme une poudre bleu foncé.

L'oxyde cuivrique CuO est une poudre noire provenant principalement de mines de Cu d'Australie. Il est obtenu par réduction.

c) Zinc (Zn)

Les sulfate (22 % Zn), chlorure (48 %), carbonate (52 %) et oxyde (80 %) sont des sources de même efficacité (MILLER et al., 1967).

Le Zn métallique est également une bonne source.

Les minerais bruts : Sphalérite, Franklinite, sont peu utilisables.

L'oxyde de Zn est obtenu par oxydation des vapeurs de Zn. Le Zn métal est fondu à 407° et distillé à 907°. Il se présente sous forme d'une poudre blanche.

Le sulfate, également en poudre blanche, est obtenu par attaque du métal par l'acide sulfurique.

d) Manganèse (Mn)

Les sources traditionnelles : chlorure (27 % Mn), sulfate (32 %), carbonate (47 %), oxyde (77 %) ont une éfficacité équivalente.

Certains minerais bruts sous forme de carbonate ou de silicate seraient inutilisables (UNDERWOOD, 1971).

L'oxyde de Mn est obtenu par réduction du minerai $MnO_2$ en MnO. Ce minerai provient essentiellement du Congo. L'oxyde est une poudre vert foncé.

Le sulfate est obtenu par attaque de l'acide sulfurique sur l'oxyde MnO. C'est une poudre blanche.

e) Cobalt (Co)

On obtient de bons et identiques résultats avec les chlorure (24 % Co), sulfate (24 %), carbonate (49 %), nitrate (20 %), de même qu'avec l'oxyde (FRITZ, 1969).

f) Iode (I)

Les iodures peuvent être employés, mais doivent être stabilisés pour une introduction dans un composé : iodure de potassium (76 %) ou de sodium (84 %).

Les iodates sont aussi bien absorbés et sont plus stables. Le plus employé est l'iodate de Ca.

L'iodate de Ca provient principalement du Japon. L'iode élément est extrait des cendres de goémon.

Dans leur ensemble, les oligo-éléments peuvent être utilisés sous forme d'oxydes ou de sulfates.

Les oxydes présentent certains avantages :

- non hygroscopiques,
- forte concentration en métal,
- intérêt financier à l'unité de métal contenu par rapport au sulfate (dans certains cas).

Ils ont l'inconvénient d'être moins assimilables, à l'exception de l'oxyde de Zn et du protoxyde de Mn.

Tableau B 8 : Principales sources d'oligo-éléments (RICART, 1975)

| Nom | Formule | % d'élément | Auteurs |
|---|---|---|---|
| Sulfate ferreux | $FeSO_4,7H_2O$ | 20,00 | AMMERMAN et al., 1967 |
| Chlorure ferreux | $FeCl_3,6H_2O$ | 20,30 | |
| Sulfate de Cu | $CuSO_4,5H_2O$ | 25,45 | AMMERMAN et al., 1972 |
| Chlorure de Mn | $MnCl_2,4H_2O$ | 27,70 | AMMERMAN et al., 1972 |
| Sulfate de Mn | $MnSO_4,4H_2O$ | 28,80 | |
| Sulfate de Co | $CoSO_4$ | 24,70 | AMMERMAN et al., 1972 |
| Chlorure de Co | $CoCl_2,6H_2O$ | 24,70 | |
| Nitrate de Co | $Co(NO_3)_2,6H_2O$ | 32,20 | |
| Iodure de Na | NaI | 84,30 en 15,70 % Na | HEMKENS, 1970 |
| Iodure de K | KI | 76,51 en 23,49 % K | |
| Sel marin | | 0,007 % | |

## II - Qualité et valeur alimentaire des composés minéraux

### 1. Tests de qualité des phosphates

Il existe des méthodes chimiques ou physico-chimiques simples permettant d'évaluer rapidement et de contrôler la qualité des matières premières employées dans la fabrication des composés minéraux. Il est absolument nécessaire d'avoir de telles méthodes devant la diversité des sources de phosphore et de leurs qualités. La recherche de l'efficacité et du moindre coût d'un composé impose ces méthodes.

#### a) Solubilité dans l'eau

Tous les phosphates solubles dans l'eau sont de bonnes sources de phosphore pour les animaux, mais l'inverse n'est pas toujours vrai. La solubilité dans l'eau n'est pas une condition nécessaire à la bonne utilisation d'un sel minéral par l'animal. Cette méthode n'est donc pas suffisante.

#### b) Extraction au citrate d'ammonium (GUEGUEN, 1970)

Cette méthode est principalement utilisée pour apprécier les engrais phosphatés. Deux types de citrates sont employés : le citrate d'ammonium neutre et le citrate d'ammonium alcalin à différents pH.

L'intérêt principal de cette méthode est de bien distinguer le phosphore du phosphate bicalcique et le phosphore des phosphates naturels apatitiques dont la valeur fertilisante est moindre.

Cette méthode d'extraction n'est pas à retenir pour le test de qualité des phosphates alimentaires des animaux. Par exemple, la méthode de JOULIE avec un citrate alcalin neutre (pH 11) diminue encore la solubilisation du phosphore de l'hydroxyapatite pourtant bien assimilé par les animaux. D'autre part, les citrates alcalins extraient 70 à 80 % du phosphore du phosphate alumino-calcique et ceci constitue une anomalie grave par rapport aux résultats obtenus sur animaux.

Le citrate d'ammonium neutre fournirait une échelle de classification plus étendue et des résultats plus logiques. En effet, il réhabilite certaines apatites, notamment la poudre d'os. Néanmoins, ce test reste très critiquable.

c) Solubilité dans l'acide chlorhydrique dilué (GUEGUEN, 1970)

Le principe de cette méthode est de simuler les conditions d'acidité de l'estomac. Plusieurs auteurs ont ainsi essayé de classer les phosphates en fonction de leur solubilité dans HCl à 0,4 % ou à 0,25 %.

Cette méthode est plus fiable que l'extraction par le citrate d'ammonium neutre ou alcalin. Les phosphates insolubles dans l'acide chlorhydrique dilué sont en général de mauvaises sources de phosphore pour les animaux. Mais il existe au moins une grave exception puisque le pyrophosphate de calcium, totalement inassimilable par l'animal, est extrait à 97 % par HCl à 0,4 %.

d) Extraction par l'acide citrique à 2 %

L'extraction du phosphore par l'acide citrique à 2 % est la seule méthode capable de donner des solubilités en accord avec les CUDr obtenus sur animaux.

GUEGUEN (1970) a proposé un mode opératoire dans lequel la prise d'essai du phosphate varie en fonction de sa teneur en P, de façon à maintenir constante la quantité initiale du phosphore. L'adoption d'une prise de 250 mg de phosphore, qui correspond à environ 1 g de phosphate monocalcique, permet d'attribuer la valeur 100 aux seuls phosphates en grande partie solubles dans l'eau.

Le mode opératoire préconisé par GUEGUEN est mentionné en annexe 1.

e) Résultats

La représentation graphique utilisée par HOFFMAN et al. en 1964 (GUEGUEN, 1970) pour comparer les résultats obtenus sur 11 phosphates avec l'acide cirtique à 2 %, le citrate d'ammonium neutre, ou le citrate d'ammonium

alcalin, montre clairement que l'échelle des valeurs obtenue avec l'acide citrique est la seule qui soit conforme aux efficacités biologiques connues des différents phosphates.

Le tableau B 9 indique le P total extrait, en pourcentage du phosphore total de la prise d'essai (1 g de phosphate ou 250 mg de P) après agitation à la température ambiante durant 2 heures dans 100 $cm^3$ d'acide citrique à 2 % (P/v). Les CUDr moyens du P obtenus sur animaux adultes recevant des rations classiques et un apport normal de P sont également indiqués.

Tableau B 9 : Extraction du phosphore de divers phosphates minéraux par acide citrique à 2 % (d'après GUEGUEN, 1970)

| Minerai | Pourc. extrait de 1 g de phosphate dans 100 $cm^3$ | Pourc. extrait de 250 mg de phosphate dans 100 $cm^3$ | CUDr moyen du P |
|---|---|---|---|
| Phosphate monocalcique | 100 | 100 | 60-70 |
| Phosphate tripe Na, Ca, Mg | 100 | 100 | 60-70 |
| Phosphate bicalcique | 95-100 | 90-95 | 60-65 |
| Silicophosphate de Ca et Na | 90 | 80 | 50-60 |
| Phosphate tricalcique pur | 70 | 60 | 50-60 |
| Farine d'os | 85 | 50-60 | 50-60 |
| Phosphates tricalciques naturels défluorisés | 30-80 | 20-60 | 20-50 |
| Métaphosphate de Ca | 60 | 20-30 | 30-40 |
| Pyrophosphate de Ca | 20 | 10 | 20 |
| Phosphate alumino-calcique | 10 | 9 | 20 |

2. Valeur alimentaire des composés minéraux

a) Appréciation de la valeur alimentaire

Il est très difficile de contrôler un mélange de matières premières car ce qui s'applique à chaque élément individuellement n'a plus de valeur pour le mélange. Il n'est pas possible de faire des analyses de contrôle de routine (A.P.C., 1977).

On ne peut donc se baser que sur des critères visibles à l'oeil nu : couleur (une forte proportion d'oxyde ferrique ou de phosphate alumino-calcique donne une teinte ocre rouge à l'ensemble). En laboratoire, on peut cependant déterminer la proportion soluble dans l'eau des différents éléments. Pour la partie insoluble, la chose est plus difficile. Il faut en effet savoir que l'extraction de l'acide citrique à 2 % n'est pas valable dans le cas d'un mélange de phosphate calcique et de carbonate de Ca, ce dernier diminuant l'extraction citrique du P, car il est totalement soluble dans l'acide citrique. La solubilisation des phosphates dans les réactifs citratés n'est pas due à la formation d'un complexe du P, mais seulement à la libération de l'acide phosphorique, provoquée par la formation d'un complexe citrique du Ca (GUEGUEN, 1970).

L'extraction par l'acide citrique est donc difficilement adaptable dans le cas des composés minéraux pauvres en P et riches en Ca (GUEGUEN, 1970).

On ne peut donc se fier qu'à la qualité des matières premières transformées et ensuite mélangées pour former le complément minéral.

b) Critère de qualité d'un composé

Les compléments minéraux sont chers ; par conséquent, il est important de rechercher la meilleure qualité pour un prix donné. Pour cela, il faut veiller à ce que le produit acheté réponde à quelques critères de choix.

— Qualité et quantité des éléments apportés

Le phosphore représente l'élément le plus important dans un complément minéral car il est le plus coûteux et présente de très grandes variations quant à son utilisation par l'animal. Il faut donc bien connaître le

taux de P dans le composé ainsi que sa solubilité dans l'acide citrique à 2 %. Il est également nécessaire de prendre en considération les autres éléments (Ca, Mg, Na et oligo-éléments) entrant dans la composition du produit.

— Appétence

Elle détermine l'attrait des animaux par le complément et la quantité ingérée. Elle est principalement liée au mode de présentation. L'appétence est la meilleure avec les granulés, moins bonne avec les poudres qui sont les plus délicates à l'emploi.

— Innocuité du produit

Le complément minéral ne doit être la cause d'aucun trouble toxique pour l'animal. Les risques peuvent provenir :

- des matières premières : fluor pour les minerais de phosphates ou germes pathogènes pour le phosphate bicalcique précipité d'os.

La législation actuelle (arrêté du 19 juillet 1976) atténue ce risque puisque le taux de F doit obligatoirement être inférieur à 2 000 ppm dans les composés minéraux.

Le phosphate bicalcique précipité d'os de ROUSSELOT est garanti exempt de germes pathogènes et à moins de 100 germmes non pathogènes par gramme.

- de la formulation : des excès d'iode, de fer, d'aluminium peuvent provoquer des interférences d'oligo-éléments.

— Incorporation des substances organiques

C'est le cas des vitamines, d'extraits divers. L'utilisation de ces divers additifs dans les aliments pour bétail est le plus souvent sujette à caution.

— Le prix

Nous avons vu que le P est l'élément le plus coûteux dans un complément minéral, mais, malheureusement, un prix élevé n'est pas toujours un

critère de qualité. Il faut également noter qu'il y a 2 taux de T.V.A. pour les minéraux en France.

Nous pouvons, à titre d'exemple, donner un tableau comparatif à partir d'une enquête menée dans l'Orne en 1974 par l'E.D.E. (tableau B 10).

Plusieurs produits ayant un $\frac{Ca}{P}$ compris entre 2,4 et 1,7 ont été étudiés.

## III - Présentation d'un complément minéral

Un complément minéral se présente sous différents aspects qui ont des incidences sur son utilisation.

Nous reprendrons la classification de GALLOT (1977) qui précise trois formes : solide, inclus sur support organique ou liquide.

### 1. Solide

La forme solide en granulé ou pierre à lécher est la plus facile à utiliser.

Les pierres à lécher contiennent une forte proportion de chlorure de sodium et sont donc très appétentes. La quantité consommée par les animaux est tout à fait imprécise : 10 à 160 g (GALLOT, 1977).

Pour des blocs enrichis en oligo-éléments, cela n'est pas grave car les seuils de toxicité sont élevés (PFLIMLIN, 1978).

Ces pierres peuvent être présentées à l'état brut de sel gemme et également en bassine apportant, en plus, d'autres macro-éléments et oligo-éléments. Ces bassines se conservent longtemps très bien. Leur consistance est stable. Elles ne prennent pas d'humidité ni ne se dessèchent.

Les granulés et semoulettes sont très faciles à distribuer et à contrôler. L'animal les accepte beaucoup mieux et il y a moins de gaspillage qu'avec les farines. Les granulés et semoulettes sont cependant plus chers.

Les farines, pulvérulentes, ne sont pas faciles d'emploi. Il faut les distribuer sur des aliments humides, ou prémélangés avec des tourteaux de céréales.

Tableau B 10 : Comparaison de compléments minéraux utilisés dans l'Orne (ROCHET, 1977)

| % de P et Ca garantis sur l'étiquette | Résultats analyse | | Présentation | Prix H.T. au kg | Prix en centimes par g de P soluble ac. citr. 2 % | Présence d'oligo-éléments |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | % de P et P soluble ac. citr. 2 % | % de Ca | | | | |
| 10/18 | 9,7 (100) | 17,2 | Poudre | 1,20 | 1,24 | ++ |
| | 11,7 (100) | 24,0 | Poudre | 1,19 | 1,02 | 0 |
| | 8,5 (96) | 20,9 | Poudre | 2,39 | 2,81 | ++ |
| | 8,8 (100) | 16,1 | Granulé | 1,40 | 1,59 | ++ |
| 8/16 | 8,3 (99) | 14,6 | Poudre | 0,97 | 1,17 | ++ |
| | 8,5 (91) | 15,8 | Poudre | 0,98 | 1,15 | ++ |
| | 7,9 (100) | 15,7 | Poudre | 0,93 | 1,18 | ++ |
| | 7,6 (100) | 14,0 | Semoulette | 0,84 | 1,11 | 0 |
| | 8,0 (100) | 15,4 | Poudre | 1,02 | 1,27 | ++ |
| | 7,6 (93) | 15,6 | Poudre | 1,13 | 1,49 | 0 |
| | 7,1 (95) | 15,8 | Granulé | 1,49 | 2,10 | ++ |
| 10/20 | 9,7 (100) | 20,9 | Semoulette | 0,93 | 0,96 | ++ |
| | 9,6 (100) | 21,7 | Poudre | 0,95 | 0,99 | ++ |
| | 10,3 (100) | 16,6 | Poudre | 1,02 | 0,99 | + |
| | 10,7 (98) | 21,0 | Poudre | 1,36 | 1,27 | ++ |
| | 9,6 (99) | 22,2 | Semoulette | 1,85 | 1,93 | ++ |
| | 9,7 (94) | 21,2 | Poudre | 1,80 | 1,86 | 0 |

Il est facile de reconnaître par ce tableau les variations du prix de revient du phosphore réellement utilisé par l'animal pour des produits identiques.

2. Complémentation incluse sur support organique

L'appétence du produit est alors améliorée à condition qu'il ne contienne pas plus de 3 % de Mg. Le composé est mélangé à 1/5 d'un support organique (luzerne, son, mélasse, tourteau, céréales).

L'ensemble se présente sous forme de bouchons ou de briquettes. Il est facile d'effectuer la distribution en libre service si l'on ne recherche pas la précision dans la consommation.

3. Liquides

Couramment employés aux Etats-Unis, les compléments minéraux liquides en France ne sont pas développés (RICART, 1975). Les prix sont élevés et la distribution nécessite un matériel particulier. Ce mode est surtout utilisé pour l'adjonction de phosphore sous forme de polyphosphate d'ammonium, mais surtout d'acide phosphorique qui a par ailleurs l'inconvénient de corroder les récipients (phénomène atténué si l'on mélange avec de la mélasse).

L'apport liquide d'un complément calcique est pratiquement impossible. Les taux d'oligo-éléments contenus dans ces produits sont nettement insuffisants.

## IV - Législation française concernant les composés minéraux

1. Loi du 1er août 1905

Sur la répression des fraudes dans la vente des marchandises et des falsifications des denrées alimentaires et des produits agricoles.

Cette loi condamne à l'emprisonnement de 3 mois à un an et à une amende de 24.000 à 1.200.000 francs quiconque aura trompé ou tenté de tromper le contractant :

- sur l'espèce ou l'origine,
- sur la quantité ou l'identité des choses livrées.

Sont également punis ceux qui falsifient les denrées, ceux qui exposent ou mettent en vente des produits falsifiés.

2. Loi du 3 février 1940, dite "Loi Aveline", complétée par le décret du 28 juin 1949

Cette loi réglemente le commerce des produits destinés à l'alimentation des animaux.

Tout fabricant ou vendeur de produits simples, composés ou mélassés destinés à l'alimentation des animaux est tenu, sous peine d'amende, d'apposer sur les emballages, sacs ou récipients dans lesquels la marchandise est préparée pour la vente, une étiquette portant :

- soit le nom ou la raison sociale et l'adresse du fabricant,
- soit le nom ou la raison sociale et l'adresse du vendeur, suivie d'une immatriculation conventionnelle du fabricant accordée par le service de la répression des fraudes.

En outre, lorsqu'il s'agit d'un produit composé contenant plus de 20 % de matières minérales totales, l'étiquette doit également porter les indications suivantes :

- le qualificatif "minéral",
- la mention suivante relative à la teneur en matières minérales :
  x pour cent au minimum de matières minérales totales,
  y pour cent au minimum de phosphore (P),
  y' pour cent au minimum de calcium (Ca),
  y" pour cent au maximum de chlorures (NaCl),
  y''' pour cent au maximum de matières minérales (insolubles dans l'acide chlorhydrique qui correspond à la teneur en silice).
- à titre facultatif, le qualificatif "aromatisé" s'il y a eu addition de plantes aromatiques.

3. Actualisation pour d'autres éléments (Décret du 28 novembre 1973)

Le décret du 28 novembre 1973 et ses arrêtés d'application autorise l'addition d'oligo-éléments dans la mesure où ces additifs sont dosables selon les méthodes d'analyses officielles.

L'étiquette doit porter leur teneur et leur nature.

La liste des oligo-éléments actuellement prévus est indiquée dans le tableau B 11.

Tableau B 11 : Liste et conditions d'incorporation des oligo-éléments aux aliments pour animaux (Décret du 28/11/1973 et ses arrêtés d'application)

| N° CEE | Eléments | Additifs | Teneur maximale de l'aliment en ppm de l'aliment complet |
|---|---|---|---|
| E 1 | Fer (Fe) | Fumarate ferreux<br>Citrate ferreux<br>Carbonate ferreux<br>Chlorure ferreux<br>Chlorure ferrique<br>Oxyde ferrique<br>Sulfate ferreux<br>Lactate ferreux | 1 250 (au total) |
| E 2 | Iode (I) | Iodate de calcium<br>Iodate de calcium anhydre<br>Iodure de sodium<br>Iodure de potassium | 40 (au total) |
| E 3 | Cobalt (Co) | Acétate de cobalt<br>Carbonate basique de cobalt<br>Chlorure de cobalt<br>Sulfate de cobalt<br>Sulfate de cobalt monohydraté<br>Nitrate de cobalt | 10 (au total) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| E 4 | Cuivre (Cu) | Acétate cuivrique<br>Carbonate basique de cuivre monohydraté<br>Chlorure cuivrique<br>Oxyde cuivrique<br>Sulfate cuivrique | Porcs : 200 (au total)<br>Autres espèces : 50 (au total) |
| E 5 | Manganèse (Mn) | Carbonate manganeux<br>Chlorure manganeux<br>Phosphate acide de manganèse<br>Oxyde manganeux<br>Oxyde manganique<br>Sulfate manganeux<br>Sulfate manganeux monohydraté | 250 (au total) |
| E 6 | Zinc (Zn) | Lactate de zinc<br>Acétate de zinc<br>Carbonate de zinc<br>Chlorure de zinc monohydraté<br>Oxyde de zinc<br>Sulfate de zinc<br>Sulfate de zinc monohydraté | (*) |
| 1 | Molybdène (Mo) | (Aucun sel n'est précisé) | 2,5 |
| 2 | Sélénium (Se) | (Aucun sel n'est précisé) | 0,5 |

* La teneur maximale autorisée de zinc en ppm de l'aliment complet était de 250 au total avant l'arrêté du 1er février 1977

D'autre part, l'indication du pourcentage de phosphore soluble a été autorisée pour les composés minéraux contenant plus de 50 % de matières minérales et au minimum 75 % de leur phosphore sous forme extractible à l'acide citrique à 2 %. Il est donc fortement recommandé aux éleveurs de n'acheter que des composés dont le taux de phosphore soluble dans l'acide citrique à 2 % est indiqué sur l'étiquette.

4. Arrêté du 19 juillet 1976

Cet arrêté remplace ceux du 19 octobre 1961 et du 2 février 1973 relatifs au commerce des produits destinés à l'alimentation animale.

Les aliments complémentaires ne doivent pas contenir des teneurs en substances et produits énumérés au tableau B 12, telles qu'après la dilution ou le mélange opérés pour l'utilisation de ces aliments complémentaires, les dites teneurs soient supérieures à celles qui sont fixées pour les aliments complets.

En 1973, 197 enquêtes ont été menées par PINOT. 73 agriculteurs choisissaient leur complément minéral en fonction de ce qui était inscrit sur l'étiquette, 56 en fonction du prix, 25 pour la présence d'oligo-éléments.

Il est donc important que la loi soit stricte en ce qui concerne l'information de l'acheteur et la validité des teneurs mentionnées afin que l'agriculteur trouve satisfaction dans le complément qu'il distribue à ses animaux et pour un rapport qualité/prix optimum.

Tableau B 12 : Teneurs maximales pour les substances et produits indésirables dans les aliments des animaux (arrêté du 19 juillet 1976)

| Substances | Aliments pour animaux | Teneur maximale en mg/kg (ppm) d'aliment ramené à un taux en humidité de 12 % |
|---|---|---|
| Arsenic | - Aliments simples | 2,0 |
| | A l'exception de : | |
| | Farines d'herbes, de luzerne et de trèfles déshydratés, ainsi que pulpes de betteraves sucrières déshydratées et de pulpes de betteraves sucrières déshydratées et mélassées | 4,0 |
| | Phosphates et aliments des animaux provenant de la transformation de poissons ou d'autres animaux marins | 10,0 |
| | - Aliments complets | 2,0 |
| Plomb | - Aliments simples | 10,0 |
| | A l'exception de : | |
| | Phosphates | 30,0 |
| | Levures | 5,0 |
| | - Aliments complets | 5,0 |

| | | |
|---|---|---|
| Fluor | - Aliments simples | 150,0 |
| | A l'exception de : | |
| | Aliments d'origine animale | 500,0 |
| | Phosphates | 2 000,0 |
| | - Aliments complets | 150,0 |
| | A l'exception de : | |
| | Aliments complets pour bovins | |
| | • en lactation | 30,0 |
| | • autres | 50,0 |
| | Composés minéraux pour bovins | 2 000,0 |
| Mercure | - Aliments simples | 0,1 |
| | A l'exception de : | |
| | Aliments des animaux provenant de la transformation de poissons ou d'autres animaux marins | 0,5 |
| Nitrites | - Aliments complets | 0,1 |
| | - Farines de poissons | 80,0 (exprimé en nitrite de sodium) |

## C - APPLICATIONS PRATIQUES DANS LES RATIONS

### I - Composition des aliments

#### 1. Rappels sur les principaux facteurs de variation de la composition des aliments

##### a) Le sol

D'une manière générale, des subcarences en cuivre, zinc, cobalt et sélénium sont constantes dans les fourrages français.

Il est évident que la teneur des plantes en minéraux est fonction de la nature du sol sur lequel elles poussent. Elles en sont le reflet. Deux aspects sont à considérer : d'une part la roche mère et sa composition et, d'autre part, les facteurs favorisant la disponibilité des éléments (drainage, pH, climat, potentiel d'oxydo-réduction, travail du sol).

Les fourrages pauvres en cuivre se retrouvent sur des roches granitiques, métamorphiques et des sédiments primaires. C'est-à-dire qu'on peut les observer dans le Massif Central, le Massif Armoricain et les Vosges (correspondant au Puy-de-Dôme, à la Creuse, au Sud de l'Indre, à la Corrèze, à la Haute-Vienne, au Nord de la Dordogne, au Morbihan, à la Loire-Atlantique et au Nord Deux-Sèvres). Cette pauvreté en Cu se retrouve également sur les sédiments calcaires secondaires et tertiaires (Crêtes pré-ardennaises, Bocage normand, Perche, Poitou, Anjou, Saintonge, Périgord, Aquitaine, Lannemezan et Sud-Est) (PERIGAUD et al., 1972).

Il est à remarquer que certains antécédents culturaux modifient la teneur du sol. Par exemple, les vignobles font place à des cultures à haute teneur en Cu (NIKPOUR et al., 1973).

Les carences en zinc se retrouvent sur les mêmes sols calcaires ou peu acides, généralement assez humides et compacts. Ces sols ont une faible disponibilité de cet élément (DARTIGUES, 1964).

Un défaut de molybdène est indiqué dans la Marne, l'Indre, la Dordogne et le Lot-et-Garonne.

Quant au sélénium, tous les sols en sont pauvres (PERIGAUD et al., 1972).

D'après les observations faites par ROCHET (1977), seules les teneurs du sol en $P_2O_5$, K et Mg semblent influencer les teneurs de la plante en ces mêmes éléments.

- La teneur de la plante en Mo semble varier dans le même sens que la teneur du sol en $P_2O_5$.
- Une teneur élevée du sol en K entraîne une diminution de la teneur de la plante en Na.
- Les teneurs convenables en Mn dans la plante se trouvent en sols acides.

Le climat intervient partiellement dans l'assimilabilité des minéraux par la plante. Cela est démontré par les écarts saisonniers existants, indépendamment des variations dues au stade physiologique de la plante. Ainsi, en période de sécheresse, les fourrages ont tendance à être plus pauvres en P et K, alors que la luzerne est plus riche en Ca. Par contre, des pluies abondantes transforment un sol de structure fragile en un milieu réducteur rendant le S, Cu et Co moins assimilables.

Les conditions de température, d'hygrométrie et de luminosité ont, par ailleurs, une incidence sur la photosynthèse des plantes et, en contrepartie, sur leur composition (PLANQUAERT, 1979).

L'influence de la circulation d'eau et du drainage n'est pas non plus à négliger, notamment pour le manganèse. De très faibles variations dans les facilités de circulation d'eau entraînent une différence de composition des plantes, ce qui explique la très forte hétérogénéité de cet élément.

Les eaux d'irrigation peuvent contenir des oligo-éléments en fonction de leur origine. Ces eaux ont parfois une action directe en apportant ces éléments en quantité élevée. Leur action peut également être indirecte par les phénomènes d'entraînement, de lessivage, d'assimilabilité en intervenant sur les propriétés physiques du sol.

La manière de travailler le sol peut jouer également par son tassement ou son aération. L'aération du sol favorise la formation d'oxydes manganiques peu assimilables et entraîne donc des carences en manganèse. Pour le

zinc, c'est souvent le contraire (TROCME, 1975).

Enfin, le transfert des éléments minéraux du sol par les plantes vers les ruminants est plus ou moins efficace (figure C 1).

c) La fumure

Les essais de fertilisation sont très difficiles à interpréter car les résultats dépendent de nombreux facteurs (sol, climat, espèces...). On peut cependant retenir quelques faits :

Certains engrais peuvent apporter des éléments qu'ils contiennent. C'est le cas des scories contenant du Mn, des superphosphates contenant du Zn.

Ils peuvent également agir indirectement par antagonisme ou synergie. Les antagonismes P-Zn et Mo-S sont connus mais sont peu importants, car la supplémentation est facile.

Par contre, les nitrates favorisent l'absorption du Mn, les polyphosphates celle du Zn (TROCME, 1975).

La figure C 2 nous donne une idée des résultats à attendre pour la fertilisation.

Etudions maintenant les effets des principaux engrais.

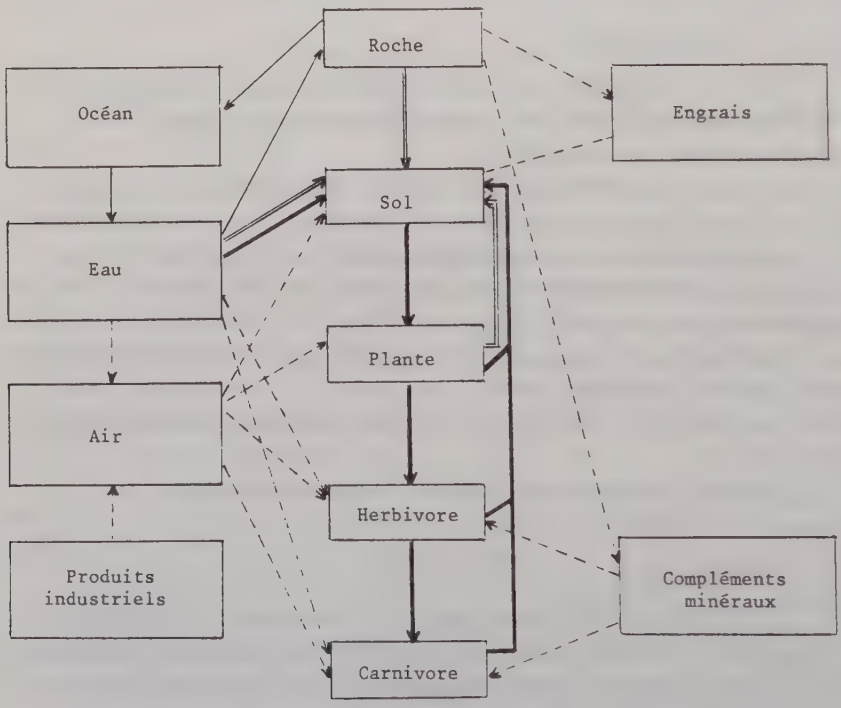
— Fumure azotée

Une fumure azotée a des effets très variables sur la composition des plantes en macro-éléments (figure C 2), comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-après des effets de la fertilisation sur la composition minérale ; cette fumure augmente la teneur en P pour autant que le niveau du sol soit élevé (tableau C 1).

Cette fumure azotée modifie un peu plus les teneurs en Mg, plus fortement celles en K et Ca et très fortement le Na.

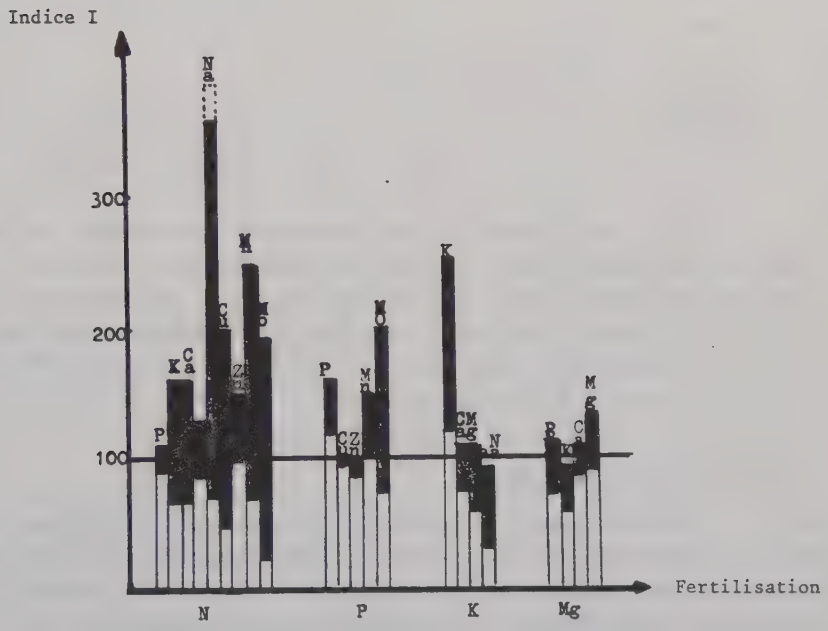
En ce qui concerne les oligo-éléments, les effets sont variables en fonction de la teneur du sol. La fertilisation peut augmenter la capacité d'absorption de la plante ou entraîner une dilution dans une production plus grande (PLANCQUAERT, 1979).

Figure C 1 : Liaisons et interférences : cycle des éléments minéraux (LAMAND, 1980)




—— Processus à l'échelle du milliard d'années (géologie)
═══ Processus à l'échelle de la centaine d'années (pédologie)
—— Processus à l'échelle de quelques années (cultures)

Figure C 2 : Effets de la fertilisation sur la composition minérale des fourrages (PLANCQUAERT, 1979)




$$\text{Indice I} = \frac{\text{Teneur du fourrage fertilisé}}{\text{Teneur du même fourrage témoin}} \times 100$$

▮ Intervalle des teneurs possibles dans les essais de fertilisation

Tableau C 1 : Evolution de la teneur en P en fonction de la fumure azotée : en g de P par kg MS (LAMBERT et al., 1978)

| Fumure azotée (N kg/ha) | Nombre d'échantillons | Teneur en P (g/kg MS) |
|---|---|---|
| 0 | 132 | 2,86 |
| 25-50 | 88 | 2,90 |
| 75-100 | 100 | 3,19 |
| 150-200 | 80 | 3,04 |

L'effet dépressif sur le Zn et le Mo est le plus fréquent. Il existerait une dose optimum d'azote correspondant à une teneur maximum de la plante en oligo-éléments. Mais cette dose est fonction de trop nombreux facteurs pour être évaluée. Les teneurs en Mn sont souvent améliorées (Cf. tableau C 2 : Influence de la fumure azotée sur la composition en oligo-éléments de quelques graminées, d'après PERIGAUD, 1974).

— Fumure phosphatique

Une telle fumure augmente surtout la teneur en P (Cf. figure C 2), particulièrement dans les sols pauvres et plus nettement chez les légumineuses que chez les graminées. Mais, à partir d'un certain niveau, la teneur n'évolue plus (PLANCQUAERT, 1979). Cependant, des expériences menées par LAMBERT et al. (1978) pendant 5 ans sur des prairies ont montré que les différences n'étaient pas statistiquement significatives. Par contre, l'épandage d'engrais liquides (orthophosphates et polyphosphates) augmente significativement les teneurs en P des plantes récoltées en début d'épiaison, qui est le meilleur stade pour la récolte. Cette teneur est augmentée de 1 g par kg de matière sèche.

Tableau C 2 : Influence de la fumure d'azote sur la composition en oligo-éléments de quelques graminées (essai I.N.R.A.-Lusignan, 1969) (PERIGAUD, 1974)

| Dose d'azote (en kg N/ha) | | N = 0 | | | | N = 250 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Espèce et variétés | Date de coupe | Cu | Zn | Mn | Mo | Cu | Zn | Mn | Mo |
| RAY-GRASS ANGLAIS Primevère (précoce) | 09/05 | 2,7 | 15 | 69 | 0,93 | 2,8 | 15 | 113 | 0,50 |
| | 27/06 | 4,9 | 19 | 80 | 1,73 | 5,6 | 26 | 114 | 1,75 |
| | 08/08 | 7,3 | 26 | 86 | 4,02 | 6,3 | 28 | 162 | 2,86 |
| | 24/09 | 9,6 | 38 | 101 | 2,21 | 8,4 | 28 | 141 | 1,14 |
| | 20/11 | 7,5 | 26 | 149 | 1,45 | 7,6 | 27 | 176 | 1,43 |
| DACTYLE Floréal (demi-précoce) | 09/05 | 5,7 | 18 | | 1,15 | 4,2 | 21 | | 0,96 |
| | 27/06 | 3,2 | 23 | | 2,32 | 5,5 | 23 | | 2,32 |
| | 08/08 | 4,0 | 20 | | 6,40 | 5,2 | 20 | | 2,64 |
| | 24/09 | 5,3 | 26 | | 5,40 | 7,7 | 26 | | 2,56 |
| | 20/11 | 7,2 | 29 | | 5,00 | 7,7 | 29 | | 4,22 |
| FETUQUE DES PRES Séquana (demi-précoce) | 20/05 | 2,7 | 16 | | 1,10 | 3,0 | 14 | | 0,67 |
| | 07/07 | 4,2 | 15 | | 2,03 | 6,0 | 12 | | 1,79 |
| | 19/08 | 5,0 | 14 | | 1,49 | 6,5 | 26 | | 1,04 |
| | 06/10 | 5,0 | 27 | | 1,33 | 5,7 | 17 | | 0,94 |
| | 25/11 | 4,5 | 23 | | 1,58 | 6,2 | 21 | | 1,59 |
| FLEOLE Pécora (demi-précoce) | 16/05 | 3,7 | 21 | 77 | 0,35 | 4,0 | 24 | 80 | 0,65 |
| | 30/06 | 5,0 | 26 | 100 | 0,64 | 4,7 | 25 | 75 | 0,73 |
| | 08/08 | 4,0 | 25 | 175 | 0,61 | 6,2 | 21 | 77 | |
| | 24/09 | 8,0 | 34 | 94 | 2,02 | 6,7 | 28 | 119 | 0,54 |

.../...

Suite tableau C 2

| Dose d'azote (en kg N/ha) | | N = 500 | | | | N = 1 000 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Espèce et variétés | Date de coupe | Cu | Zn | Mn | Mo | Cu | Zn | Mn | Mo |
| RAY-GRASS ANGLAIS Primevère (précoce) | 09/05 | 3,5 | 21 | 143 | 0,58 | 4,0 | 25 | 153 | 0,56 |
| | 27/06 | 5,3 | 26 | 137 | | 4,5 | 23 | 117 | 1,46 |
| | 08/08 | 6,5 | 33 | 203 | 2,57 | 6,2 | 40 | 245 | 1,70 |
| | 24/09 | 10,0 | 34 | 201 | 0,73 | 9,6 | 34 | 269 | 0,53 |
| | 20/11 | 9,2 | 36 | 246 | 1,11 | 8,0 | 38 | 454 | 0,89 |
| DACTYLE Floréal (demi-précoce) | 09/05 | 4,7 | 20 | | 0,66 | 5,0 | 21 | | 0,73 |
| | 27/06 | 6,0 | 24 | | 1,50 | 6,5 | 21 | | 1,70 |
| | 08/08 | 6,2 | 22 | | 1,74 | 6,7 | 26 | | 1,41 |
| | 24/09 | 9,0 | 27 | | 1,44 | 10,0 | 28 | | 1,34 |
| | 20/11 | 8,5 | 30 | | 1,78 | 9,5 | 36 | | 1,41 |
| FETUQUE DES PRES Séquana (demi-précoce) | 20/05 | 3,0 | 17 | | 0,47 | 2,5 | 17 | | 0,44 |
| | 07/07 | 5,0 | 16 | | 1,12 | 4,5 | 18 | | 0,87 |
| | 19/08 | 6,5 | 23 | | 1,07 | 5,7 | 24 | | 0,72 |
| | 06/10 | 6,2 | 22 | | 0,85 | 6,2 | 21 | | 0,50 |
| | 25/11 | 6,2 | 22 | | 1,11 | 6,0 | 22 | | 0,91 |
| FLEOLE Pécora (demi-précoce) | 16/05 | 4,5 | 26 | 90 | 0,65 | 5,5 | 28 | 111 | 0,82 |
| | 30/06 | 4,2 | 18 | 81 | 0,80 | 4,0 | 18 | 86 | 1,13 |
| | 08/08 | 6,5 | 23 | 97 | | 4,7 | 27 | 142 | 0,99 |
| | 24/09 | 7,0 | 28 | 193 | | 7,2 | 30 | 215 | 0,84 |

Tableau C 3 : Effet de la fertilisation en $P_2O_5$ sur la teneur en phosphore du fourrage (en % de MS) (PLANCQUAERT, 1979)

| Dose d'engrais ($P_2O_5$) | 0 | 120 |
|---|---|---|
| Teneur en P du fourrage | 0,38 | 0,44 |

Ces engrais ne jouent pratiquement pas sur les autres éléments majeurs, mais ils interfèrent avec le Mn et surtout le Mo pour quelquefois le doubler.

— Amendements calcaires

Ceux-ci peuvent influer en modifiant le pH du sol. Des carences manganiques sont alors observées ainsi qu'une augmentation du taux de Mo et en conséquence une carence induite en Cu. D'après COPPENET (1964), lorsque le pH passe de 5 à 7, dans le Massif Armoricain, la composition du Ray-Grass d'Italie baisse de 30 % pour le Co, 50 % pour le Zn et 75 % pour le Mn.

— Les engrais potassiques

Ils améliorent les teneurs en potassium, peuvent améliorer ou diminuer celles en Ca et Mg et diminuer fortement (par 3 ou 4) celles du Na, comme l'indique la figure C 2.

Une fertilisation en éléments majeurs bien conduite et tenant compte du sol et des plantes tend à augmenter les teneurs des fourrages. Cependant, elle n'empêchera jamais la complémentation directe de l'animal.

c) Qualité des fourrages

La composition des fourrages varie beaucoup au cours de la croissance et du développement des graminées, spécialement au cours du premier cycle, c'est-à-dire en phase reproductrice. Le stade est donc un des facteurs qui influent le plus sur la composition des plantes.

Au cours du premier cycle, le rapport feuilles sur tiges diminue de 46 % à 11 %. Les limbes sont en général plus riches que les gaines et les tiges en P, K, Ca et Mg.

Tableau C 4 : Composition des feuilles et des tiges de luzerne (en % de MS) (PLANCQUAERT, 1979)

| Elément | Calcium | Phosphore | Potasse | Magnésium | Fer |
|---|---|---|---|---|---|
| Feuilles | 2,22 | 0,24 | 2,06 | 0,40 | 0,34 |
| Tiges | 0,82 | 0,17 | 2,21 | 0,26 | 0,15 |

Des expériences ont été faites afin de comparer les teneurs d'une herbe fraîche et d'un foin provenant d'une même prairie (LAMAND, 1978). L'étude portait sur un Ray-Grass italien au stade épiaison du premier cycle. Une partie était récoltée et congelée en vert, l'autre était séchée sur le champ pendant 5 semaines en période pluvieuse. Le foin était pailleux non moisi. Un bilan réalisé sur des agneaux a montré que la digestibilité et la rétention en cuivre et en zinc du foin pailleux étaient très inférieures à celles observées sur l'herbe distribuée en vert. En ce qui concerne le manganèse, un enrichissement était observé. Sa digestibilité et sa rétention étaient supérieures pour le foin.

Tableau C 5 : Digestibilité comparée de l'herbe et du foin (LAMAND, 1978)

| | Cu | | | Zn | | | Mn | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Teneur (a) | Digest. (%) | Ret. (b) | Teneur (a) | Digest. (%) | Ret. (b) | Teneur (a) | Digest. (%) | Ret. (b) |
| Herbe | 4,5 | 10,0 | 1,23 | 25,0 | 23,0 | 15,30 | 69,0 | 5,0 | 8,4 |
| Foin | 5,3 | - 3,7 | - 0,38 | 28,8 | - 4,0 | - 2,33 | 101,0 | 14,9 | 31,4 |

(a) en mg/kg MS - (b) en mg/100 kg/j

Le stade d'exploitation de la plante est important pour la teneur. D'une façon générale, les foins les plus pauvres en Cu et Co sont les graminées au premier cycle, cultivées sur des sols pauvres en Cu et Co et bien fertilisées en azote. Les fourrages insuffisants en Mn sont les luzernes, particulièrement sur les sols calcaires (GUEGUEN, 1978).

Les secondes coupes sont mieux pourvues. Toutefois, la différence est faible.

Le déprimage par un passage précoce d'animaux en début de saison augmente légèrement les teneurs moyennes en Cu et Zn des foins de première coupe ultérieure.

Les regains sont toujours plus riches que les premières coupes (1,18 ppm de Mo et 0,16 ppm de Se contre 0,63 et 0,05) (PERIGAUD et al., 1972).

d) Présentation des aliments

L'utilisation des minéraux de l'aliment est liée à son mode de présentation. Une expérience faite sur des agneaux avec une alimentation à base de luzerne a permis de mesurer l'influence du hachage sur l'utilisation des éléments (AMBOULOU et al., 1977).

Les animaux étaient alimentés avec de la luzerne sous forme normale hachée (en brins de 3 cm de long), broyée (à la grille de 0,6 mm) et agglomérée (en bouchons de 6 mm de diamètre).

En comparaison de la forme longue, le broyage de la luzerne a entraîné :

- une augmentation de la matière sèche ingérée de 34 % ;
- une accélération de la vitesse de transit dans le tube digestif. Les temps de séjour des particules dans le rumen ont été de 46 heures pour la forme longue et 40-41 heures pour la forme broyée et, dans l'intestin, les durées étaient respectivement de 22-24 heures et 13-16 heures ;
- une diminution de la digestibilité et de la rétention des éléments minéraux, principalement du Cu, du Zn et du Mn. Les digestibilités du Mg et Ca ont également significativement baissé. Ces diminutions sont dues à l'accélération du transit (tableau C 6).

Il faut considérer également la présentation sous forme d'ensilage. L'herbe sous forme d'ensilage est récoltée jeune. Les ensilages sont donc mieux pourvus que les foins.

Les ensilages de maïs sont très pauvres en Mn.

Un autre problème réside dans l'incorporation d'urée et de soufre pour augmenter la valeur protéique. L'adjonction de S peut entraîner des carences en oligo-éléments, comme nous le verrons plus loin.

Les souillures ne sont pas à négliger dans les aliments, principalement dans les ensilages, qui sont quelquefois récoltés dans de mauvaises conditions et dans lesquels on retrouve de la terre.

Tableau C 6 : Influence de la vitesse de transit sur la digestibilité et la rétention des éléments (AMBOULOU, 1977)

| | | Luzerne 3 cm long | Luzerne broyée (bouchons) | Comparaison luzerne longue |
|---|---|---|---|---|
| Cu | T (mg/kg MS) | 8,4 | 8,6 | |
| | CUD (%) | 16,7 | 6,4 | 38,0 |
| | R (mg/100 kg) | 4,9 | 2,6 | 53,4 |
| Zn | T (mg/kg MS) | 26,5 | 34,5 | |
| | CUD (%) | 23,8 | 14,2 | 59,5 |
| | R (mg/100 kg) | 23,2 | 23,1 (NS) | |
| Mn | T (mg/kg MS) | 35,5 | 37,7 | |
| | CUD (%) | 24,5 | 10,6 | 43,4 |
| | R (mg/100 kg) | 34,2 | 19,3 | 56,5 |
| Ca | T (mg/kg MS) | 18,7 | 17,4 | |
| | CUD (%) | 28,6 | 20,3 | |
| | R (mg/100 kg) | 20,6 | 16,4 (NS) | |
| Mg | T (mg/kg MS) | 1,9 | 1,9 | |
| | CUD (%) | 45,3 | 37,0 | |
| | R (mg/100 kg) | 3,1 | 3,3 (NS) | |
| P | T (mg/kg MS) | 1,8 | 2,0 | |
| | CUD (%) | 46,5 | 42,9 (NS) | |
| | R (mg/100 kg) | 3,2 | 3,8 (NS) | |

NS = non significatif

T = teneur

CUD = digestibilité

R = rétention

Tableau C 7 : Influence de la terre sur la digestibilité et la rétention des oligo-éléments (LAMAND, 1978)

| | Régime | Ensilage seul | Ensilage + 5 % terre |
|---|---|---|---|
| Cu | T (mg/kg) | 4,0 | 4,8 |
| | CUD (%) | - 1,5 | - 10,6 |
| | R (mg/100 kg) | - 0,1 | - 1,1 |
| Zn | T (mg/kg) | 33,7 | 36,3 |
| | CUD (%) | 15,5 | 4,4 |
| | R (mg/100 kg) | 13,9 | 3,6 |
| Mn | T (mg/kg) | 110,0 | 146,0 |
| | CUD (%) | 7,2 | - 6,9 |
| | R (mg/100 kg) | 21,9 | - 19,5 |

Les paramètres négatifs indiquent que l'ensilage est carencé.

On peut remarquer que la contamination enrichit l'aliment en Cu, Zn et Mn, mais la digestibilité et la rétention de ces trois éléments diminuent.

e) Interactions des différents éléments

La part d'un élément, dans une plante ou dans une ration, utilisable par l'animal est fonction bien souvent des autres éléments présents à côté de lui. Ce sont les interactions qui créent les éléments les uns sur les autres. Nous allons maintenant en étudier les principales.

— Cuivre, molybdène, fer et soufre

L'influence du Mo sur le Cu est bien connue. Une teneur élevée en Mo (au-delà de 3 mg/kg MS) rend le Cu inutilisable dans ses fonctions. Les

ions sulfates ont le même pouvoir. Ce phénomène serait la conséquence de deux actions (ELAM, 1975) :

1) La formation de molybdate cuprique qui est absorbé puis excrété, rendant 2 Cu et 1 Mo moins assimilables.

2) La formation d'un sulfite cuprique qui est insoluble dans le rumen, l'intestin ou les tissus. Il faut donc une bonne utilisation de ces trois éléments dans les rations.

Des expériences ont été faites sur des génisses Holstein avec différentes teneurs en Mo, Cu et S sulfate.

Les rations contenant 50 ppm de Mo avec un régime pauvre en Cu et sans addition de sulfates ne provoquaient aucun trouble. Les résultats étaient identiques avec 5-20 ppm de Mo et 0,3 % de sulfates. Mais, en ajoutant 0,3 % de S en sulfate et 50 ppm de Mo des troubles de molybdène apparaissaient et que l'on pouvait réduire en ajoutant du Cu (AMMERMAN, 1970).

Ces expériences confirment les hypothèses mentionnées ci-dessus.

Enfin, certains auteurs ont également observé le rôle d'une forte teneur en protéines des rations, entraînant une libération de sulfure formant un complexe avec le cuivre... Ce complexe insoluble est très peu assimilable.

— Interférence avec le calcium

Certains auteurs (LAMAND, 1978 ; THOMAS, 1970) ont montré que le calcium en excès pouvait diminuer la digestibilité du Cu et du Mn, bien qu'une telle interférence ne soit pas observée avec les légumineuses pourtant riches en Ca. Cette remarque serait également valable pour le zinc (HAARANEN, 1963).

— Influence du soufre

La pratique de l'ensilage, ces dernières années, a nécessité l'emploi d'azote. La complémentation se fait souvent avec de l'urée et du soufre. Mais, les interférences avec le S sont nombreuses.

Le gain de croît des taurillons est diminué par addition de soufre inorganique dans le régime de 10 à 14 %, mais l'addition de potassium en même

temps paraissait contrecarrer cette diminution. De même, la rétention du Ca et du P était diminuée par addition de sulfate au régime de veaux. Il y aurait formation de sulfite de Ca dans le rumen (ELAM, 1974).

D'autres études faites sur les gains de poids vif ont montré qu'une addition de 0,1 à 0,4 % de S en sulfate à une ration contenant 2 ppm de Mo et 10 ppm de Cu diminuait la croissance des animaux (ELAM, 1974) (tableau C 8).

Tableau C 8 : Influence du soufre sur la digestibilité et la rétention des oligo-éléments (LAMAND, 1978)

| Facteur étudié | Cu | | Zn | | Mn | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Digest. (%) | Rétention (%) | Digest. (%) | Rétention (%) | Digest. (%) | Rétention (%) |
| Addition de 0,6 g S/kg MS | NS | 71 | NS | NS | 48,2 | 37,5 |
| Addition de 2,9 g S/kg MS | NS | NS | 62,1 | 66,6 | 42,3 | 57,7 |
| Addition de 2,9 g S/kg MS + 30 % maïs grain | NS | NS | 65,4 | 55,1 | 41,5 | 32,2 |

NS = non significatif

Avec un apport exagéré, le S interfère avec Zn et Mn.

Un ensilage pauvre en énergie aggrave l'interférence du S qui est gaspillé dans le rumen sous forme de sulfure, diminuant la digestibilité des oligo-éléments.

Nous avons vu plus haut que le S agissant avec le Cu en formant un complexe de sulfite cuprique insoluble.

Certains auteurs (HINTZ et al., 1964) ont émis l'hypothèse que l'addition de sulfates au régime des veaux augmenterait l'incidence de la dystrophie musculaire.

Il apparaît en conséquence que le soufre interfère nettement avec les oligo-éléments et cela d'autant plus que le niveau énergétique de la ration est bas ; il est donc préférable de ne pas enrichir la ration au-delà d'un certain optimum se situant à 2 g S/kg MS et d'augmenter les apports en oligo-éléments.

## 2. Tables de composition des aliments

Nous ne pouvons donner que des valeurs moyennes de composition. Il faut ensuite tenir compte des différents facteurs de variation pour les utiliser.

D'une manière générale, les fourrages sont déficitaires en P, et mieux pourvus en Ca. Les légumineuses sont 3 à 4 fois plus riches en Ca que les graminées, mais sont toujours inférieures aux besoins. Les crucifères ont des compositions voisines de celles des légumineuses. Les teneurs en Mg sont voisines des recommandations, contrairement au Na.

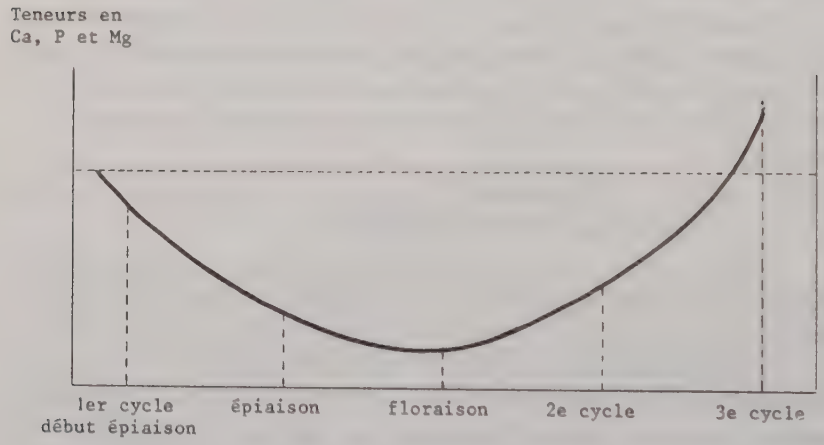
Les céréales sont toujours pauvres en Ca et riches en P dont 80 % sous forme phytique (bien assimilée par les ruminants). Elles sont pauvres en Na et en Zn. Par contre, elles sont bien pourvues en Mg, Fe, Cu. Le K peut être déficitaire dans les rations des jeunes bovins.

Les tourteaux ont des teneurs variables en Ca. Ils sont pauvres en Na, bien pourvus en Mg. Le P est en quantité satisfaisante ; ils sont également riches en Mg, Fe et Cu. Le Na et le zinc sont insuffisants. Il faut remarquer que la composition minérale des céréales n'est pas influencée par la fertilisation.

Les aliments d'origine animale sont riches en P de bonne qualité et bien pourvus en autres minéraux (sauf le Fe pour le lait).

Lorsque nous observons les compositions des aliments, nous constatons que les teneurs en Ca, P et Mg diminuent depuis le stade épaison jusqu'à un minimum à la floraison. Les teneurs augmentent à nouveau au cours du deuxième et troisième cycle pour atteindre la valeur la plus élevée.

Figure C 3 : Evolution des teneurs minérales (Ca, P, Mg) des graminées en fonction de leur stade végétatif




Pour les fourrages secs, le principe est le même, sauf pour le Mg qui reste à peu près constant. La récolte par temps de pluie provoque une diminution de 0,5 g de Ca et P par kg de matière sèche.

Les légumineuses ont des teneurs à peu près constantes en minéraux, quel que soit le stade, de même que les fourrages déshydratés. La teneur des ensilages n'est pas modifiée par rapport aux fourrages déshydratés. La teneur des ensilages n'est pas modifiée par rapport aux fourrages verts.

Tableau C 9 : Composition en macro-éléments des principaux aliments (g/kg MS) (d'après DEMARQUILLY et al., 1978)

| Aliments | Nature | Ca | | | P | | | Mg | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) |
| Prairie naturelle de plaine | Vert | 7,0 | 5,5 | 7,5 | 4,0 | 2,5 | 4,0 | 2,0 | 1,5 | 3,0 |
| | Sec | 6,5 | 5,0 | 7,5 | 3,5 | 2,5 | 3,5 | 2,0 | 1,5 | 2,5 |
| Prairie naturelle de montagne | Vert | 8,0 | 6,5 | 11,0 | 4,5 | 2,5 | 4,5 | 3,0 | 2,5 | 4,5 |
| | Sec | 7,0 | 6,5 | 11,0 | 3,5 | 2,5 | 4,0 | 2,5 | 2,5 | 4,5 |
| Brome | Vert | 5,0 | 3,5 | 7,0 | 5,0 | 2,5 | 4,0 | 1,5 | 1,0 | 2,0 |
| Dactyle | Vert | 4,0 | 2,5 | 6,5 | 4,0 | 2,0 | 3,5 | 2,0 | 1,5 | 2,5 |
| | Sec | 3,0 | 2,5 | 5,0 | 2,5 | 2,0 | 3,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 |
| Fétuque des prés | Vert | 5,5 | 4,5 | 6,0 | 3,5 | 2,5 | 3,5 | 2,0 | 1,5 | 2,5 |
| Fétuque élevée | Vert | 4,0 | 3,5 | 5,5 | 3,5 | 2,5 | 4,5 | 2,0 | 1,5 | 2,5 |
| Fléole | Vert | 4,0 | 3,0 | 5,0 | 3,5 | 2,0 | 3,5 | 1,5 | 1,0 | 1,5 |
| | Sec | 3,5 | 2,5 | 4,0 | 2,5 | 2,0 | 3,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Ray-grass italien | Vert | 5,0 | 4,5 | 5,5 | 3,5 | 2,5 | 3,5 | 1,5 | 1,0 | 2,0 |
| | Sec | 4,5 | 4,0 | 5,0 | 3,0 | 2,0 | 3,5 | 1,0 | 1,0 | 2,0 |
| Ray-grass anglais | Vert | 5,5 | 5,5 | 6,0 | 4,0 | 2,5 | 4,5 | 2,0 | 1,5 | 1,5 |
| Luzerne | Vert | 17,0 | 16,0 | 18,5 | 3,0 | 2,5 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 2,5 |
| | Sec | 15,0 | 16,0 | 14,5 | 2,5 | 3,0 | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 2,0 |
| Sainfoin | Vert | 9,5 | 9,5 | 9,5 | 3,5 | 3,0 | - | 2,5 | 2,0 | - |
| Trèfle violet | Vert | 14,0 | 13,0 | 14,0 | 3,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,0 | 4,0 |
| | Sec | 12,0 | 11,5 | 12,5 | 2,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 2,5 | 3,5 |

(a) Stade épiaison, (b) Stade floraison (Teneur minimale, (c) 3e cycle (teneur maximale)

Tableau C 9 (suite)

| Aliments | Ca | P | Mg |
|---|---|---|---|
| Feuilles et collets de betteraves | 13,0 | 2,5 | 4,0 |
| Choux | 14,0 | 3,5 | 2,0 |
| Colza | 14,0 | 4,0 | 2,0 |
| Paille d'avoine | 3,5 | 1,0 | 1,5 |
| Paille d'orge | 3,5 | 1,0 | 1,5 |
| Paille de blé | 2,0 | 1,0 | 1,0 |
| Rafles de maïs broyées | 3,5 | 0,5 | 1,0 |
| Luzerne déshydratée et condensée | 17,0 | 3,0 | 2,0 |
| Maïs plante entière compactée | 3,5 | 2,5 | 1,5 |
| Ray-grass italien condensé | 4,5 | 3,0 | 1,0 |

Tableau C 10 : Composition en macro-éléments des céréales et de leurs sous-produits (g/kg MS) (d'après DEMARQUILLY et al., 1978)

| Aliments | Ca | P | Mg | K | Na |
|---|---|---|---|---|---|
| Avoine | 0,9 | 3,8 | 1,6 | 4,1 | 0,7 |
| Blé dur | 0,4 | 3,9 | 1,1 | 3,6 | 0,1 |
| Blé tendre | 0,7 | 3,7 | 1,2 | 4,3 | 0,5 |
| Escourgeon | 0,7 | 3,5 | 1,6 | 4,7 | 0,5 |
| Maïs | 0,3 | 3,5 | 1,1 | 3,1 | 0,6 |
| Seigle | 0,7 | 4,4 | 1,2 | 4,8 | 0,3 |
| Sorgho | 0,3 | 3,2 | 1,4 | 3,2 | 0,4 |
| Son gros de blé | 1,2 | 12,3 | 4,4 | 10,9 | 0,1 |
| Son fin de blé | 1,5 | 12,8 | 5,1 | 11,3 | 0,5 |
| Mélasse de betteraves (avec 50 % de sucres totaux dans le produit brut) | 3,5 | 0,3 | - | - | - |
| Tourteau d'arachide (décortiqué expeller) | 2,0 | 6,0 | 3,3 | 11,7 | - |
| Tourteau de soja (déshuilé 42/44) | 3,7 | 7,0 | 2,6 | 18,9 | - |
| Tourteau de lin (déshuilé) | 4,7 | 9,4 | 5,4 | 12,7 | 1,1 |
| Drèches de brasserie fraîches | 3,3 | 5,7 | 1,4 | 0,8 | - |
| Marc de pommes séché | 1,5 | 1,1 | 0,6 | 4,4 | - |

Tableau C II : Teneurs en oligo-éléments des principaux aliments (mg/kg MS ou ppm)
(d'après ANDRIEU, 1978)

| Aliments | Nature | Cuivre | | | Zinc | | | Manganèse | | | Molybdène | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) |
| Prairie naturelle | Vert<br>Sec | 7,4<br>2,8 | 5,9<br>5,2 | 5,0<br>8,0 | 48,0<br>13,0 | 36,0<br>29,1 | 34,0<br>60,0 | 149,0<br>12,0 | 148,0<br>158,0 | 141,0<br>580,0 | 0,87<br>- | 0,83<br>0,63 | 0,75<br>- |
| Dactyle | Vert | 7,5 | 6,0 | 8,7 | 32,0 | 23,0 | 30,8 | 112,0 | 105,0 | 194,0 | 2,28 | 1,49 | 3,37 |
| Fétuque des prés | Vert | 5,4 | 4,8 | 6,6 | 23,8 | 19,5 | 27,1 | 90,5 | 86,5 | 115,0 | 0,67 | 0,87 | 1,10 |
| Fétuque élevée | Vert | 6,5 | 5,1 | 6,3 | 38,0 | 20,9 | 22,8 | 81,3 | 77,9 | 131,0 | 1,14 | 0,80 | 0,76 |
| Ray-Grass anglais | Vert | 5,2 | 4,0 | 6,9 | 23,9 | 19,5 | 33,8 | 84,7 | 74,0 | 151,0 | 1,60 | 1,01 | 1,73 |
| Ray-Grass italien | Vert<br>Sec | 8,1<br>- | 5,0<br>4,9 | 6,8<br>- | 32,2<br>- | 23,8<br>26,5 | 31,8<br>- | 85,1<br>- | 79,6<br>110,0 | 124,0<br>- | -<br>- | -<br>- | -<br>- |
| Fléole | Vert | 5,4 | 3,8 | 6,6 | 37,4 | 25,3 | 27,0 | 77,5 | 59,7 | 114,0 | 1,03 | 1,05 | 0,95 |
| Brome | Vert | 8,6 | 7,4 | 6,9 | 24,7 | 23,0 | 22,0 | 46,0 | 40,0 | 40,0 | - | - | - |
| Sorgho | Vert | 10,2 | 5,5 | 7,9 | 35,3 | 26,5 | 31,0 | - | 41,3 | - | - | - | - |

.../...

Tableau C 11 (suite)

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Luzerne lère coupe | Vert<br>Sec | 8,8<br>- | 7,7<br>7,1 | 8,9<br>- | 32,3<br>- | 22,0<br>24,6 | 22,8<br>- | 26,7<br>- | 27,5<br>29,0 | 36,6<br>- | 1,30<br>- | 0,56<br>- | 0,17<br>- |
| Trèfle violet | Vert<br>Sec | 9,3<br>- | 8,7<br>6,7 | 9,8<br>- | 28,3<br>- | 26,1<br>21,0 | 36,4<br>- | 35,3<br>- | 30,1<br>62,7 | 46,0<br>- | 1,05<br>- | 0,47<br>- | 0,21<br>- |
| Sainfoin | Vert | 5,8 | 5,8 | 6,6 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 55,8 | 55,8 | 95,0 | - | - | - |
| Choux | Vert | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 20,0 | 30,5 | 40,0 | 24,0 | 43,2 | 65,0 | - | - | - |
| Orge | Paille | 2,3 | 31,0 | 4,7 | 3,0 | 7,3 | 12,0 | 4,0 | 17,6 | 26,3 | - | - | - |
| Maïs ensilage | | - | 6,1 | - | - | 26,0 | - | - | 55,6 | - | - | - | - |
| Betteraves racine | | 5,5 | 7,0 | 8,0 | 21,0 | 28,0 | 37,0 | 20,0 | - | 50,0 | - | - | - |

(a) Valeur extrême = début 1er cycle

(b) Valeur moyenne = stade épiaison des graminées, stade floraison des légumineuses

(c) Valeur extrême = 3e cycle

b) Composition en oligo-éléments

Plus que pour les macro-éléments, la composition en oligo-éléments des aliments varie en fonction de nombreux facteurs. Nous avons vu dans les chapitres précédents l'influence de ces facteurs.

D'une manière générale, les graminées concentrent moins bien le Cu du sol que les légumineuses.

L'état végétatif règle la teneur en oligo-éléments des graminées. Cette teneur est en décroissance régulière avec l'âge.

Pour les légumineuses, ce stade végétatif n'intervient pas.

Les fourrages récoltés de façon précoce (avant épiaison) renferment généralement des taux suffisants de Cu et Zn.

Les céréales voient une augmentation de leurs teneurs lors de la maturation des grains (NIKPOUR et al., 1978).

c) Qualité des différentes sources

Les sources végétales ont l'inconvénient de contenir une faible concentration de phosphore, qui a une mauve digestibilité, sauf les tourteaux de sésame et de coton mais qui sont peu employés.

Les phosphates d'origine animale, farine de viande et surtout phosphate précipité d'os, sont très assimilables ; ils contiennent d'autres éléments intéressants et ne présentent pas d'éléments indésirables. La seule précuation à prendre est de limiter les germes pathogènes, par une stérilisation préalable.

Les phosphates d'origine minérale contiennent de nombreuses impuretés qu'il faut éliminer ou réduire. Certaines ne sont qu'inutiles, telle la silice (jusqu'à 3 %), d'autres, comme le fluor, sont toxiques. Les directives communautaires de la C.E.E. ont fixé le taux de fluor maximum à 0,2 %.

Les minerais marocains contiennent un fort pourcentage de F, mais ils sont facilement défluorés par le traitement acide. Ces minerais présentent également une forte proportion de sable.

La Floride exporte un minerai difficile à traiter.

Tableau C 12 : Composition en oligo-éléments des céréales et de leurs résidus (mg/kg MS) (d'après ANDRIEU, 1978)

| Aliment | Cuivre | Zinc | Manganèse | Molybdène | Cobalt | Sélénium |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Avoine G | 3,5 | 25,2 | 38,4 | 0,70 | 0,02 | 0,04 |
| Blé G | 4,4 | 32,5 | 33,7 | 0,30 | 0,02 | 0,04 |
| Maïs G | 2,3 | 21,4 | 10,8 | 0,30 | 0,02 | 0,02 |
| Orge G | 4,1 | 24,4 | 17,6 | 0,30 | 0,01 | 0,02 |
| Arachide T | 14,5 | 61,5 | 47,5 | 1,70 | 0,30 | 0,11 |
| Colza T | 5,5 | 64,5 | 63,5 | 0,50 | 0,10 | 0,07 |
| Lin T | 21,0 | 73,0 | 59,0 | 0,60 | 0,60 | 0,50 |
| Soja T | 17,1 | 54,6 | 43,7 | 2,30 | 0,30 | 0,20 |
| Son T | 11,7 | 59,0 | 123,0 | 0,60 | 0,03 | 0,05 |

G = grains ; T = tourteau

Les phosphates sont caractérisés par leur teneur en phosphate de calcium en unité BPL (Bone Phosphate Lime)(1). Les minerais du Maroc font en moyenne 72 BPL, ceux du Togo 82 BPL.

La composition de quelques minerais livrés à l'APC à Grand-Couronne en 1976 a été donnée dans le tableau B 3.

(1) BPL : phosphate calcique d'os ; un minerai à 5 % de $P_2O_5$ correspond à 10,92 % BPL

## II - Méthodes de complémentation

### 1. Fourrages sur pied

Cette méthode se fait par apport au sol ou par pulvérisation foliaire. Elle n'a d'intérêt que si les plantes sont très carencées, car elle ne sera jamais assez précise pour complémenter une ration des animaux. Nous ne considérons pas dans ce chapitre les macro-éléments que nous avons étudiés avec les engrais.

Quatre techniques d'apport ont été expérimentées par l'I.N.R.A. à Quimper (COPPENET et al., 1975) :

- enfouissement par le labour qui précède le semis,
- incorporation par les façons superficielles précédant le semis,
- apport sur la prairie en place au début de la végétation,
- pulvérisation foliaire.

Les résultats ont été les suivants :

Tableau C 13 : Indices d'enrichissement obtenus pour des Ray-Grass italiens récoltés au stade pâture selon le mode d'apport du sel (COPPENET et al., 1975)

| Apport au sol | Enfouissement par labour | Façons superficielles | Prairie en place | Pulvérisation foliaire |
|---|---|---|---|---|
| Cuivre sulfate (120 kg/ha) | X 1,10 | X 1,2 | X 1,33 | X 2,0 (0,5 kg/ha) |
| Zinc sulfate (50 kg/ha) | — | X 2,5 | X 2,40 | X 2,0 (2 kg/ha) |
| Cobalt sulfate (2 kg/ha) | X 1,25 | X 2,5 | X 10,00 | X 2,6 (10 g/ha) |

L'épandage sur prairie déjà implantée est le plus efficace. Pour le cuivre, la pulvérisation foliaire est encore plus intéressante.

Voyons maintenant les enrichissements en principaux oligo-éléments.

a) En cuivre

Les fourrages doivent contenir environ 10 mg Cu/kg MS. Pour atteindre ce résultat, les apports doivent être importants, de l'ordre de 25-50 kg de sulfate de cuivre par hectare en épandage. Même dans ce cas, le fourrage récolté est souvent carencé.

La pulvérisation foliaire, par contre, donne des résultats beaucoup plus satisfaisants. Elle permet d'utiliser des doses 20 à 30 fois plus faibles, mais il ne doit pas y avoir formation de gouttes tombant sur le sol. Le système foliaire doit être bien développé et au plus en début de montaison. Enfin, il faut tenir compte des conditions climatiques et de l'utilisation des plantes dans le choix et les doses du produit.

Parmi les formes solubles, les sulfates pénètrent plus vite et mieux dans la plante, mais sont facilement éliminés par la pluie et sont caustiques à de faibles concentrations. Le sulfate pur est à réserver pour l'utilisation en pâture aux doses suivantes :

- 100 g Cu/ha au 1er cycle,
- 25-30 g Cu/ha sur des cycles de plein été sec,
- 50-70 g Cu/ha en fin d'été non sec.

Les formes insolubles comme l'oxyde, l'oxychlorure, le sulfate neutralisé au lait de chaux, sont plutôt réservées pour les récoltes tardives et abondantes type ensilage ou pour des exploitations précoces en pâture par temps pluvieux.

b) Zinc

Les remarques faites pour le Cu sont valables pour cet élément. Les teneurs doivent être d'environ 50 mg Zn/kg. Le sulfate de Zn peut être employé en apport sur le sol à la dose de 25-50 kg/ha. En pulvérisation

Tableau C 14 : Digestibilité des oligo-éléments dans des fourrages verts ou ensilages enrichis par des sulfates ou des oxydes -LAMAND, 1976)

| | Ray-Grass anglais 1er cycle, en vert | | Fétuque lutine 1er cycle, ensilage | | Ray-Grass anglais 1er cycle, ensilage | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Témoin | Sulfates | Témoin | Oxydes | Témoin | Oxydes |
| **CUIVRE** | | | | | | |
| Teneur (mg/kg MS) | 6,6 | 10,0 | 8,2 | 35,5 | 5,7 | 23,1 |
| Digestibilité (%)(1) | 10,3 | 7,3 | 7,0 | 8,1 | 3,5 | 4,2 |
| Digestibilité de l'élément seul (%)(2) | — | 1,5 | — | 8,4 | — | 4,4 |
| Rétention (mg/100 kg) | 1,7 | 1,9 | 1,3 | 7,0** | 0,5 | 2,0* |
| **ZINC** | | | | | | |
| Teneur (mg/kg MS) | 24,5 | 34,3 | 30,7 | 52,0 | 25,7 | 55,2 |
| Digestibilité (%) | 3,3 | 6,0 | 6,9 | 11,2* | 10,2 | 10,3 |
| Digestibilité de l'élément seul (%) | — | 12,7 | — | 17,4 | — | 10,4 |
| Rétention (mg/100 kg) | 2,3 | 5,4 | 5,0 | 14,5** | 5,9 | 11,2 |
| **MANGANESE** | | | | | | |
| Teneur (mg/kg MS) | 64,0 | 71,9 | 76,6 | 98,9 | 50,0 | 75,5 |
| Digestibilité (%) | - 12,9 | 6,2* | 8,7 | 6,5 | 9,7 | 17,1** |
| Digestibilité de l'élément seul (%) | — | 160,0 | — | - 1,0 | — | 32,0 |
| Rétention (mg/100 kg) | - 13,0 | 10,9* | 16,7 | 15,9 | 10,6 | 27,1** |

(1) Digestibilité de l'élément total de la plante

(2) Digestibilité de l'élément venant de la pulvérisation

* Résultat significativement supérieur ($P < 0,05$)

** Résultat sinigficativement supérieur ($P < 0,01$)

foliaire, on emploie le sulfate neutralisé ou l'oxyde dans les mêmes conditions que le Cu (cf. Tableau C 14).

c) En cobalt

Il en faut au moins 0,1 mg/kg MS. Contrairement aux autres éléments, l'apport au sol est efficace.

Le sulfate de Co à raison de 2 kg/ha sur sol acide implanté de Ray-Grass d'Italie permet à celui-ci d'augmenter sa teneur de 6 à 11 fois et encore de 2 fois la deuxième année.

Les pulvérisations foliaires sont plus onéreuses, mais possibles à raison de 10 g/hectare.

d) En manganèse

L'apport de Mn est peu intéressant car un sel de cet élément est peu assimilable et disparaît rapidement. L'oxyde de Mn est le plus utilisé (60 g de Mn/ha) (Tableau C 14).

L'apport au sol est d'un emploi très courant pour les macro-éléments par les engrais. En ce qui concerne les oligo-éléments, la pulvérisation foliaire donne les meilleurs résultats si elle est bien utilisée. Elle doit se faire dans de bonnes conditions climatiques (sans pluie). Il faut noter également que plusieurs oligo-éléments peuvent être pulvérisés conjointement sous forme d'oxyde... Les proportions sont de 1 Cu, 3 Zn, 2 Mn (PERIGAUD, 1976).

2. Apports à l'animal

La complémentation minérale à l'animal doit être précise pour éviter les risques de carences, d'excès ou d'interactions néfastes. Elle peut se faire de différentes manières : en libre service, incorporée à la ration de base ou par voie parentérale.

a) Libre service

Le libre service nécessite un produit de grande ingestibilité et très appétent pour que l'animal le consomme sans difficulté. La pratique du libre service peut se faire de différentes manières.

— Pierres à lécher

C'est la forme la plus connue, notamment pour l'apport de chlorure de sodium. Cette méthode peut être également très intéressante pour les oligo-éléments. Par contre, elle ne peut permettre un apport phospho-calcique suffisant, car les apports doivent être très précis. La consommation de pierres à lécher est à peu près liée au poids vif de l'animal, mais n'est pas liée à un besoin instinctif. Il y a donc de fortes variations individuelles de consommation. Les consommations vont de 10 à 200 g/jour. Il est utile de s'assurer que la consommation du bloc permet bien de couvrir le déficit en oligo-éléments.

L'utilisation des pierres à lécher est indiquée pour la complémentation en sodium. Pour les oligo-éléments, cette méthode est un pis-aller lorsque l'apport individuel est impossible.

— Distributeurs

De nombreux appareils sont maintenant commercialisés pour la distribution de concentrés en libre service. Ces distributeurs sont utilisés lors de distribution au pâturage. Ils permettent également de complémenter la ration des veaux sans que leurs mères puissent y accéder.

Les granulés sont recommandés plutôt que les farines qui sont pourtant moins chères.

— Complémentation sur support organique

Cette méthode qui incorpore les éléments minéraux sur un support très apprécié augmente l'appétence du complément. Les supports, employés pour un tiers, sont habituellement de la luzerne, du tourteau ou des céréales. Le tout est présenté sous forme de bouchons ou de briquettes. Là encore, les

niveaux de consommation sont très variables et les apports non précis. Elle n'est donc envisageable que pour les animaux hivernants et les génisses avant le vêlage.

- Complémentation liquide (RICART, 1975)

Les complémentations liquides sont très peu utilisées en France, mais très développées aux Etats-Unis, principalement pour l'apport de phosphore. La distribution est facile dans l'eau de boisson et avec un distributeurs à boule. Les polyphosphates d'ammonium et l'acide phosphorique sont les plus employés. L'acide phosphorique est acide et corrosif, ce qui pose des problèmes de stockage. Les phosphates sont peu concentrés.

La complémentation calcique par cette forme n'est pas encore concevable.

Des oligo-éléments sont également proposés, mais à des taux trop bas.

Le tout est trop coûteux à l'heure actuelle pour une utilisation courante.

b) Incorporation à la ration de base

Nous ne considèrerons pas l'incorporation aux fourrages sur pied, que nous avons étudiée plus haut. L'élément le plus intéressant est l'adjonction du supplément au moment de la récolte. Cette technique s'est développée avec la pratique de l'ensilage. Le supplément peut être apporté seul (5 kg/tonne d'ensilage à 30 % MS) ou en mélange avec 50 % d'urée (10 kg/tonne d'ensilage à 30 % MS) (GALLOT, 1977). Le produit se présente sous forme de poudre ou de grains. Il existe cependant des difficultés d'adjonction, de répartition dans le silo, de conditions de récolte et d'estimation des rendements.

L'incorporation peut se faire au moment de la distribution en saupoudrant la ration. Cet aspect présente un intérêt pour les vaches laitières auxquelles on distribue ce complément pendant la traite. Pour les bovins en croissance, cela demanderait une manipulation supplémentaire. Les aliments composés pour ces animaux sont bien souvent complémentés en minéraux, ce qui évite

donc plusieurs distributions. Il suffit que ces animaux soient en lots d'âge identique et avec un même taux de croissance ; ils ont alors à peu près les mêmes besoins.

c) Voie parentérale

Cette méthode est surtout employée à titre curatif et pour un temps bref, éventuellement en préventif pour les oligo-éléments. Les produits les plus utilisés et les plus pratiques d'emploi sont les formes retard. L'inconvénient réside dans le prix de revient de ces compléments et dans la contention nécessaire des animaux. Cette complémentation peut se faire de deux manières : injection de substances retard ou ingestion de bols se délitant lentement dans le rumen.

Parmi les solutions buvables, les sulfates de cuivre, de zinc et de manganèse, à raison de 4 g par jour et par animal pendant 10 jours, donnent de bons résultats pour traiter les carences.

Des formes injectables sont maintenant bien tolérées par les animaux, car moins caustiques. Des suspensions retard permettent d'apporter 125 mg de Cu, 600 mg de Zn ou 150 mg de Mn. Ces solutions protègent l'animal pendant 2 mois et demi environ.

Les bols les plus connus sont ceux de l'oxyde de cobalt pouvant protéger les animaux pendant 6 mois (LAMAND et al., 1975).

Enfin, il faut signaler une méthode originale de complémentation indirecte pour le veau. Des essais menés par LAMAND (1972) pour prévenir la myopathie du veau ont montré que la supplémentation de la ration des vaches en sélénium permettait de quadrupler la teneur du lait et de doubler la teneur des tissus des veaux à la naissance.

## III - Méthode de choix d'un complément

### 1. Mode de calcul de l'apport

L'apport d'un complément minéral pourra être établi lorsque les cinq points suivants seront connus :

- les normes minérales alimentaires,
- l'état physiologique et les performances des animaux,
- la formule du régime et, parfois, les quantités ingérées,
- la composition minérale des divers constituants du régime,
- les quantités ingérées et les différences par rapport aux besoins théoriques (GUEGUEN, 1975).

#### a) Etude des rations

L'établissement des rations se préoccupe d'abord de l'équilibre du niveau énergétique et azoté. L'étude du bilan minéral se fait ensuite, en commençant par le Ca et le P.

La principale difficulté réside dans l'évacuation des teneurs des aliments qui sont très variables, comme nous l'avons vu. Lorsque l'apport doit être précis, il faut procéder à une analyse des fourrages utilisés. Il est possible de consulter les tables des teneurs pour les graines (céréales, légumineuses, tourteaux, certains produits laitiers, et les substances minérales pures). Ces tables doivent être bien sûr récentes.

Pour les fourrages, des analyses sont nécessaires sur de petites régions caractérisées par un même type de sol, de climat, de culture, de conditions de récolte. Les résultats obtenus ont une précision variable selon les éléments et doivent être interprétés. Des variations peuvent en effet apparaître en fonction des conditions de prélèvement, des techniques de dosage, de l'exploitation des résultats.

Les précisions des analyses sont à peu près les suivantes :

— à 5 % ( - pour P : par spectrophotométrie et gravimétrie,
( - pour Ca et Mg : gravimétrie, complexométrie et absorption atomique,
( - pour K et Na : émission de flamme.

— à 10 % { - pour Zn, Fe, Mn et Cu : absorption atomique,
{ - pour P : extraction de l'eau ou dans l'acide citrique à 2 %
{ dans les phosphates et les composés minéraux.

— à 20 % (par des méthodes non officielles) :
- pour Co, Mo, Se, Hb, Pb : absorption atomique ou spectrophotométrique (GUEGUEN, 1975)

Lorsque ces résultats sont connus et rapportés à la matière sèche, il faut évaluer la complémentation.

b) Evaluation de la complémentation

Cette évaluation se fera en comparant les besoins théoriques des animaux aux apports par la ration. Le complément minéral tiendra donc compte de la nature et de l'importance du déficit en exigeant une certaine précision afin d'éviter les risques de carence, d'excès ou d'interaction. Mais il faut faire la part des choses, et un écart de 10 % entre les besoins et les apports ne suffit pas pour caractériser une carence. Il faut au moins 20 % pour parler d'insuffisance (GUEGUEN, 1975).

Le choix du complément se fera d'abord en fonction du P et du Ca étant donné l'importance de ces deux éléments pour la croissance des animaux. On complète ensuite avec les autres macro-éléments, puis les oligo-éléments, en tenant compte de la part de l'élément utilisable dans le produit.

c) Exemple de calcul

La méthode la plus simple consiste à présenter les éléments sous forme de tableau. Voyons cette méthode simplifiée.

Tableau C 15 : Schéma simplifié de calcul d'une ration pour bovin

1) Composition des aliments (ration composée de A, B, C)

| Composition/MS | UF | MAD | Ca | P | VE |
|---|---|---|---|---|---|
| A | - | - | - | - | - |
| B | - | - | - | - | - |
| C | - | - | - | - | - |

2) Besoins des animaux

3) Apports par les aliments. Les quantités ingérées sont calculées par rapport à l'énergie puis aux MAD.

4) Bilan

| | UF | MAD | Ca | P |
|---|---|---|---|---|
| A | - | - | - | - |
| B | - | - | - | - |
| C | - | - | - | - |
| Total | X | X | X | X |
| Besoins animal | Y | Y | Y | Y |
| Déficit | $\neq 0$ | $\neq 0$ | X-Y | X-Y |

Nous évaluons ainsi le Ca et le P à apporter, puis nous effectuons le bilan en oligo-éléments.

Voyons maintenant un exemple de complément minéral distribué à des bovins à raison de 100 g par jour (tableau C 16).

## 2. Choix et classification des compléments

Il est bien évident que, pour des raisons économiques, les industriels ne peuvent pas produire des compléments adaptés à chaque régime. Compte tenu de la précision exigée, des apports et du prix du phosphore, nous pouvons classer les compléments en fonction du Ca et du P et plus exactement du rapport $\frac{Ca}{P}$. Dans ce classement, l'utilisateur pourra ensuite choisir en fonction de la qualité du P et des prix des produits qui sont très variables (PINOT, 1975).

Les compléments sont représentés par deux chiffres : pourcentage de P total et pourcentage de Ca. $\frac{Ca}{P}$ est donc facile à calculer.

Tableau C 16 : Exemple de calcul d'un complément en oligo-éléments distribué à raison de 100 g/j et par animal (LAMAND et al., 1975)

| Elément | Déficit journalier à couvrir | Forme de sel | Proportion de l'élément dans le sel | Facteur de multiplication | Quantité/j dans 100 g de CM | Composition du condiment |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu | 60,0 mg | $CuSO_4,5H_2$ | 1/4 | 4 | 240,0 mg | 2,4 g/kg |
| Co | 1,2 mg | $CoSO_4,7H_2O$ | 1/5 | 5 | 6,0 mg | 60,0 mg/kg |
| I | 7,2 mg | $Ca(IO_3)_2$ | 2/3 | 3/2 | 10,0 mg | 100,0 mg/kg |
| Mn | 360,0 mg | $MnSO_4,H_2O$ | 1/3 | 3 | 1,0 g | 10,0 g/kg |
| Zn | 300,0 mg | $ZnSO_4,7H_2O$ | 1/4 | 4 | 1,2 g | 12,0 g/kg |
| Se | 0,6 mg | $SeO_3Na_2$ | 1/2 | 2 | 1,2 mg | 12,0 mg/kg |

a) Classification en fonction du rapport phospho-calcique

— Première catégorie : $\frac{Ca}{P}$ supérieur à 1,66 : pour les rations à base de maïs. Le maïs étant déficient en oligo-éléments, les compléments doivent en contenir.

— Deuxième catégorie : $\frac{Ca}{P}$ de l'ordre de 1 et 1,66 : c'est une catégorie intermédiaire pour les rations contenant une quantité limitée de maïs.

— Troisième catégorie : $\frac{Ca}{P}$ de l'ordre de 1 : les compléments de ce type correspondent aux rations peu déficitaires en calcium, pour les foins de prés, ou de trèfles mélangés à du Ray-Grass d'Italie.

— Quatrième catégorie : $\frac{Ca}{P}$ entre 0,6 et 1 : les compléments contiennent peu de Ca ou beaucoup de P. Ils conviennent pour des rations contenant des foins de légumineuses, de crucifères ou des pulpes de betteraves.

— Cinquième catégorie : $\frac{Ca}{P}$ inférieur à 0,66 : minéraux très riches en P convenant à des rations de base à forte proportion de foin, de légumineuses, de crucifères ou de pulpes de betteraves.

b) Choix en fonction de la qualité

Il faut s'attacher à la qualité du phosphore et principalement à sa solubilité dans l'acide citrique, car de grandes variations existent, comme nous l'avons démontré dans le chapitre sur la qualité des composés minéraux. Le tableau C 17 nous montre les variations existant entre les valeurs trouvées par analyse et celles mentionnées sur les étiquettes.

Le mode de présentation doit être adapté au mode de distribution et conditionne en partie le prix. Les poudres sont les moins coûteuses.

Tableau C 17 : Qualité des composés minéraux analysés dans quelques départements après enquête (BOEUF, 1978)

| Département | Année | Nombre d'échantillons | % de solubilité du phosphore | | | % de composés minéraux à teneur en phosphore | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 100 à 90 | 89 à 80 | 80 | à celle indiquée sur l'étiquette | à celle indiquée sur l'étiquette |
| Eure-et-Loir | 1973 | 77 | 73,0 % | 14,0 % | 13,0 % | 45,0 % | 55,0 % |
| Orne | 1974 | 150 | 86,0 % | 8,0 % | 6,0 % | 64,5 % | 35,5 % |
| Cantal | 1975 | 40 | 72,5 % | 15,0 % | 12,5 % | 50,0 % | 50,0 % |
| Sarthe | 1975 / 1976 | 92 | 85,0 % | 10,0 % | 5,0 % | 32,0 % | 68,0 % |
| Allier | 1976 | 60 | 80,0 % | 16,0 % | 4,0 % | 45,0 % | 55,0 % |
| Côtes du Nord | 1976 | 111 | 93,7 % | 3,6 % | 2,7 % | 42,0 % | 58,0 % |

c) Présence d'oligo-éléments

Leur quantité contenue n'est pas toujours en rapport avec les besoins des animaux. Leur addition aux composés est pourtant facile et évite de faire une complémentation parallèle.

d) Le prix

Des enquêtes ont été faites sur la quantité et le prix des compléments minéraux du commerce, montrant une grande variabilité. On s'aperçoit alors qu'un prix élevé ne veut pas toujours dire qualité. L'élément le plus onéreux étant le phosphore, on peut très bien établir le rapport qualité/prix d'un composant minéral en évaluant le prix du gramme de phosphore soluble. C'est ce que nous avons vu dans le tableau B 10.

3. Exemples d'apport

Dans ce chapitre, nous étudierons quelques rations couramment distribuées. Nous les composerons en nous fondant sur les recommandations de l'I.N.R.A. (1978).

Le calcul de la matière sèche ingérée se fera à partir de la valeur d'encombrement, de la valeur énergétique des aliments et des besoins des animaux à différents stades de croissance. Lorsque l'équilibre énergétique sera atteint, nous complèterons pour obtenir la quantité de MAD nécessaire.

La complémentation minérale sera ensuite aisément établie en faisant le bilan des apports et des besoins. Nous considèrerons le problème phospho-calcique et magnésien qui nécessite une plus grande précision.

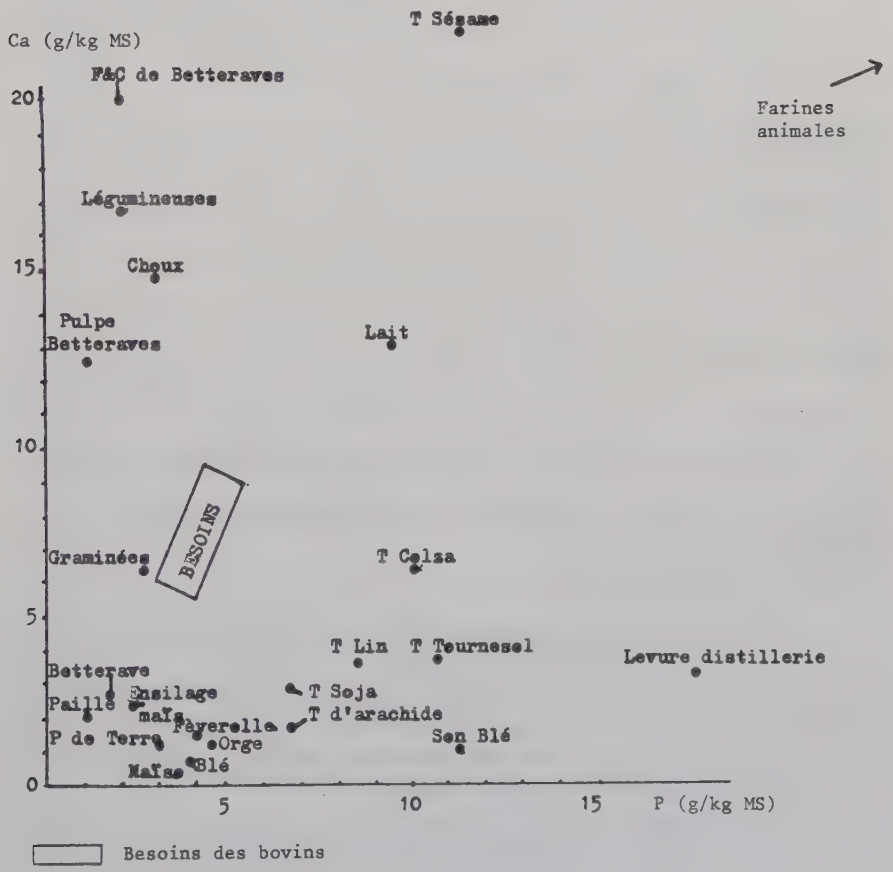
Dans un dernier temps, nous nous intéresserons aux autres macro-éléments et aux oligo-éléments, uniquement en fonction des aliments utilisés, sans faire intervenir les catégories d'animaux.

La figure C 4 représente la supplémentation phospho-calcique à apporter en fonction des aliments utilisés.

Tableau C 18 : Rapport de prix du phosphore soluble dans l'acide citrique à 2 % d'après des enquêtes menées dans quelques départements ($\frac{Ca}{P}$ = 1) (d'après BOEUF, 1978)

| Département | Année de l'enquête | Composés minéraux granulés | | | Composés minéraux poudre ou semoulette | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Prix le + élevé (1) | Prix le - éleve (1) | Rapport | Prix le + élevé (1) | Prix le - élevé (1) | Rapport |
| Eure-et-Loir | 1973 | 2,00 | 1,46 | 1,37 | 3,05 | 0,83 | 3,72 |
| Orne | 1974 | 3,10 | 1,16 | 2,67 | 3,70 | 0,88 | 4,20 |
| Cantal | 1975 | 2,40 | 1,50 | 1,60 | 3,40 | 1,20 | 2,82 |
| Sarthe | 1975 | 1,84 | 1,13 | 1,63 | 2,04 | 1,18 | 1,73 |
| | 1976 | 3,30 | 1,70 | 1,94 | 1,82 | 1,01 | 1,80 |
| Côtes-du-Nord | 1976 | 3,08 | 1,32 | 2,33 | 2,18 | 0,88 | 2,48 |

Figure C 4 : Composition en Ca et P de quelques aliments. Besoins des bovins (d'après SAUVANT, 1975)



a) Composition des aliments utilisés dans les exemples de rations (par kg de MS) (d'après DEMARQUILLY et al., 1978)

Tableau C 19

| | VEF | UFL | UFV | MAD | Ca (g) | P (g) | Mg (g) | K (g) | Na (g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Herbe de pâturage (permanente) | 0,88 | 0,96 | 0,92 | 121 | 7,0 | 4,0 | 2,0 | - | - |
| Foin de pâturage (début épiaison) | 1,25 | 0,79 | 0,71 | 74 | 6,5 | 3,5 | 2,0 | - | - |
| Ensilage de maïs à 28 % de MS | 1,10 | 0,85 | 0,79 | 42 | 3,5 | 2,5 | 1,5 | - | - |
| Orge grain | - | 1,16 | 1,16 | 88 | 0,9 | 4,0 | 1,2 | 5,0 | 0,5 |
| Maïs grain | - | 1,27 | 1,28 | 75 | 0,3 | 3,5 | 1,1 | 3,1 | 0,6 |
| Tourteau de soja 48/50 | - | 1,20 | 1,19 | 495 | 3,3 | 7,5 | 2,6 | 18,9 | - |
| Paille d'orge | 1,27 | 0,41 | 0,30 | 0 | 3,5 | 1,0 | 1,5 | - | - |

VEF = valeur d'encombrement du fourrage en unité d'encombrement (UE)

UFL = Unité fourragère "lait"

UFV = unité fourragère "viande"

b) Ration pour de jeunes bovins en croissance

A titre d'exemple, nous considèrerons de jeunes bovins en croissance à différents poids, avec un gain moyen quotidien de 700 g/jour.

Nous avons choisi trois types de ration pour ces animaux :

- ration I : herbe de pâturage
- ration II : foin
- ration III : maïs ensilage et tourteau de soja

Tableau C 20 : Complémentation d'une ration à base d'herbe pour jeunes bovins

| Poids vif (kg) | | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| Gain moyen quotidien (g/j) | | 700 | 700 | 700 | 700 |
| Quantité ingérée (kg MS/j) | Herbe | 3,3 | 4,5 | 5,6 | 6,5 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 23,1<br>+ 5,1 | 31,5<br>+ 7,5 | 39,2<br>+ 9,2 | 45,5<br>+ 6,5 |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 13,3<br>+ 2,3 | 18,4<br>+ 1,0 | 22,4<br>- 1,6 | 26,0<br>- 3,4 |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 6,6<br>+ 4,6 | 9,0<br>+ 5,0 | 11,2<br>+ 5,6 | 13,0<br>+ 6,0 |

Cette ration est à peu près équilibrée en Ca et P, sauf pour les animaux plus âgés, où le P manque légèrement. Le Mg est excédentaire. Aucune complémentation n'est à effectuer.

Tableau C 21 : Complémentation d'une ration à base de foin pour jeunes bovins

| Poids vif (kg) | | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| Gain moyen quotidien (g/j) | | 700 | 700 | 700 | 700 |
| Quantité ingérée (kg MS/j) | Foin | 4,0 | 5,4 | 6,8 | 8,0 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 26,0<br>+ 8,0 | 35,1<br>+ 11,1 | 44,2<br>+ 14,2 | 52,0<br>+ 18,0 |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 14,0<br>+ 3,0 | 18,9<br>+ 1,9 | 23,8<br>- 0,2 | 28,0<br>- 1,0 |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 8,0<br>+ 6,0 | 10,8<br>+ 7,0 | 13,6<br>+ 8,0 | 16,0<br>+ 9,0 |

Cette deuxième ration est identique à la première. Mais, si le foin avait subi la pluie à la récolte, nous aurions une déficience en Ca et P. Dans ce cas, nous apporterions un complément type 5-0, à raison de 100 g/j, soit 1,5 % de la matière sèche ingérée.

Tableau C 22 : Complémentation d'une ration à base d'ensilage maïs pour jeunes bovins

| Poids vif (kg) | | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| Gain moyen quotidien (g/j) | | 700 | 700 | 700 | 700 |
| Quantité ingérée (kg MS/j) | Ensilage<br>Tourteau | 3,5<br>0,5 | 4,6<br>0,6 | 6,1<br>0,6 | 7,2<br>0,6 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 14,0<br>- 4,0 | 18,0<br>- 5,7 | 22,6<br>- 7,4 | 26,3<br>- 12,7 |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 12,5<br>+ 1,5 | 16,0<br>- 1,0 | 19,4<br>- 4,6 | 22,0<br>- 7,0 |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 16,5<br>+ 14,3 | 20,5<br>+ 16,6 | 23,5<br>+ 18,3 | 25,7<br>+ 18,8 |

Le Mg est toujours excédentaire. Le déficit en Ca est plus important que celui en P. Il faudra donc apporter environ 2 g de Ca pour 1 g de P. Nous choisirions un complément type 8-16 et nous en distribuerions 100 à 150 g/j selon l'âge des animaux. C'est-à-dire 2 à 2,5 % de la matière sèche ingérée.

Pour des jeunes à croissance plus rapide, un aliment très énergétique est nécessaire, avec un complément à haute valeur protéique.

Considérons des génisses de 1 an, avec un gain moyen quotidien de 1 000 g/j. La ration sera constituée d'ensilage, de maïs grain et de tourteau.

Tableau C 23 : Complémentation d'une ration à base de maïs pour jeunes à croissance rapide

| Poids vif (kg) | | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| Gain moyen quotidien (g/j) | | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 |
| Quantité ingérée (kg MS/j) | Ensilage<br>Maïs grain<br>Tourteau | 6,1<br>0<br>0,5 | 6,3<br>0,2<br>0,6 | 6,5<br>1,2<br>0,4 | 7,0<br>2,0<br>0,3 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 23,0<br>- 10,0 | 24,0<br>- 13,0 | 24,0<br>- 21,0 | 26,0<br>- 30,0 |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 19,0<br>0 | 20,0<br>- 2,0 | 23,0<br>- 8,0 | 27,0<br>- 8,0 |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 21,6<br>+ 19,0 | 24,1<br>+ 19,0 | 21,0<br>+ 14,0 | 22,0<br>+ 14,0 |

Dans ce type de ration, Ca et P sont tous deux insuffisants. Un complément type 5-20 distribué à raison de 50 g/j pour des animaux de 250 kg et 150 g pour ceux de 500 kg rendra l'équilibre. Cette quantité correspond à 1 à 2 % de la matière sèche ingérée.

b) Rations pour des boeufs abbatus à 36-40 mois

Nous considèrerons trois exemples de ration pour ces animaux :

- ration I : herbe de pâturage
- ration II : foin + orge
- ration III : ensilage maïs + orge + tourteau

Tableau C 24 : Complémentation d'une ration à base d'herbe pour boeufs

| PV (kg) | | 500 | | 600 | | 700 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GMQ (g/j) | | 800 | 1 200 | 800 | 1 200 | 800 | 1 200 |
| QI (kg MS/j) | | 7,3 | 9,1 | 9,3 | 10,5 | 9,4 | 11,8 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 51,0<br>+ 2,0 | 64,0<br>+ 3,0 | 65,0<br>+ 11,0 | 73,0<br>+ 8,0 | 66,0<br>- | 82,6<br>- |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 29,0<br>- 2,0 | 36,0<br>- 2,0 | 37,0<br>+ 2,0 | 42,0<br>+ 3,0 | 37,0<br>- | 47,0<br>- |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 14,6<br>+ 7,2 | 18,2<br>+ 10,0 | 18,6<br>+ 10,1 | 21,0<br>+ 11,5 | 18,8<br>- | 23,6<br>- |

PV : poids vif ; GMQ : gain moyen quotidien ; QI : quantité ingérée

Cette ration ajuste les besoins à la limite pour le Ca et le P. Le magnésium est encore largement suffisant.

Tableau C 25 : Complémentation d'une ration à base de foin et d'orge pour boeufs

| Poids vif (kg) | | 500 | 600 | 700 |
|---|---|---|---|---|
| Gain moyen quotidien (g/j) | | 1 000 | 1 000 | 1 000 |
| Quantité ingérée (kg MS/j) | Foin<br>Orge | 7,0<br>2,3 | 6,0<br>4,0 | 5,5<br>4,5 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 47,0<br>- 8,0 | 42,0<br>- 17,0 | 40,0<br>- |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 34,0<br>- 1,0 | 37,0<br>+ 1,0 | 37,0<br>- |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 16,7<br>+ 8,9 | 16,8<br>+ 7,8 | 16,4<br>- |

Cette deuxième ration est déficitaire en Ca, à la limite pour le P. On lui apporte un complément type 5-15 à raison de 50 à 100 g/j, soit 0,5 à 1 % de la matière sèche ingérée. Le Mg est toujours en excédent.

Tableau C 26 : Complémentation d'une ration à base d'ensilage maïs, d'orge et de tourteau pour boeufs

| PV (kg) | | 500 | | 600 | | 700 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GMQ (g/j) | | 800 | 1 200 | 800 | 1 200 | 800 |
| QI (kg MS/j) | Ensilage<br>Orge<br>Tourteau | 8,5<br>-<br>0,5 | 10,6<br>0,5<br>0,6 | 9,6<br>-<br>0,5 | 7,4<br>2,9<br>0,4 | 10,8<br>0,5<br>0,45 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 31,0<br>- 15,0 | 39,0<br>- 22,0 | 31,5<br>- 20,0 | 29,0<br>- 36,0 | 40,0<br>- 26,0 |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 25,0<br>- 6,0 | 31,0<br>- 7,0 | 27,0<br>- 7,0 | 33,0<br>- 6,0 | 32,0<br>- 7,0 |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 14,0<br>+ 6,6 | 18,0<br>+ 9,8 | 15,7<br>+ 7,2 | 15,6<br>+ 6,1 | 18,0<br>- |

Cet exemple de ration est déficitaire en Ca et en P. La quantité de P manquante dépend de l'apport en céréales. Un complément 8-25 conviendrait, à raison de 100 à 150 g, suivant le taux de céréales. Cela représente environ 1 % de la matière sèche ingérée.

d) Rations pour taurillons

Pour les taurillons, nous envisagerons deux types de rations :

- ration I : ensilage maïs + orge + tourteau, cela pour des taurillons tardifs à viande (tableau C 27)
- ration II : maïs grain + tourteau + paille d'orge, pour des taurillons précoces laitiers (tableau C 28)

La première ration est déficitaire en Ca et P, dans des rapports variables, en fonction de la quantité d'orge et parce que les besoins en P croissent moins vite que ceux en Ca.

Dans ce cas présent, il faudrait changer de minéraux pour chaque catégorie de poids vif : 5-29 à 300 kg ; 8-16 à 400 kg ; 8-25 à 500 kg ; 5-25 à 600 kg. Ces compléments seront distribués à raison de 1,5 à 2 % de la matière sèche ingérée.

La deuxième ration contient moins de Mg, mais toujours suffisamment. Un niveau correct en Ca et P est acquis en complémentant avec un 5-25, 100 à 200 g/j, soit 2 à 3 % de la matière sèche ingérée.

Tableau C 27 : Complémentation d'une ration à base d'ensilage maïs, d'orge et de tourteau de soja, pour taurillons

| Poids vif (kg) | | 300 | 400 | 500 | 600 |
|---|---|---|---|---|---|
| Gain moyen quotidien (g/j) | | 1 200 | 1 200 | 1 200 | 1 200 |
| Quantité ingérée (kg MS/j) | Ensilage<br>Orge<br>Tourteau | 5,7<br>0,0<br>0,8 | 6,9<br>0,2<br>0,8 | 7,1<br>1,1<br>0,7 | 5,7<br>3,4<br>0,5 |
| Calcium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 22,6<br>- 19,4 | 27,0<br>- 23,0 | 26,5<br>- 34,5 | 24,5<br>- 40,5 |
| Phosphore | Apports (g)<br>Bilan (g) | 20,0<br>- 5,0 | 24,0<br>- 10,0 | 27,5<br>- 10,5 | 31,0<br>- 8,0 |
| Magnésium | Apports (g)<br>Bilan (g) | 10,6<br>+ 5,8 | 12,6<br>+ 5,6 | 13,8<br>+ 5,6 | 13,8<br>+ 4,3 |

Tableau C 28 : Complémentation d'une ration à base de maïs grain, de paille et de tourteau de soja, pour taurillons

| Poids vif (kg) | | 200 | | 300 | | 400 | | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gain moyen quotidien (g/j) | | 1 000 | 1 400 | 1 000 | 1 400 | 1 000 | 1 400 | 1 000 |
| Quantité ingérée (kg MS/j) | Paille d'orge | 1,6 | 1,2 | 2,0 | 1,6 | 2,2 | 1,7 | 2,3 |
| | Maïs grain | 2,7 | 2,9 | 3,3 | 4,3 | 4,3 | 5,7 | 5,3 |
| | Tourteau | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| Calcium | Apports (g) | 8,7 | 7,4 | 10,0 | 8,9 | 10,6 | 9,0 | 11,0 |
| | Bilan (g) | - 21,3 | - 33,0 | - 27,0 | - 38,0 | - 34,0 | - 47,0 | - 44,0 |
| Phosphore | Apports (g) | 16,0 | 17,0 | 18,0 | 21,0 | 21,0 | 26,0 | 25,0 |
| | Bilan (g) | + 0,3 | - 3,4 | - 4,0 | - 6,9 | - 10,0 | - 9,8 | - 10,0 |
| Magnésium | Apports (g) | 7,2 | 6,8 | 8,2 | 8,7 | 9,3 | 10,3 | 11,0 |
| | Bilan (g) | + 4,8 | + 3,9 | + 4,0 | + 3,9 | + 3,1 | + 3,3 | + 3,6 |

e) Complémentation en NaCl et en oligo-éléments

Nous n'envisagerons par le K, car les aliments en sont suffisamment pourvus.

Les teneurs en NaCl et oligo-éléments des aliments sont très variables. Il est donc difficile de prévoir la complémentation à effectuer sans avoir fait au préalable une analyse des composants de la ration.

Le tableau C 29, d'après GUEGUEN (1973), révèle les teneurs à respecter par rapport à la matière sèche de la ration totale.

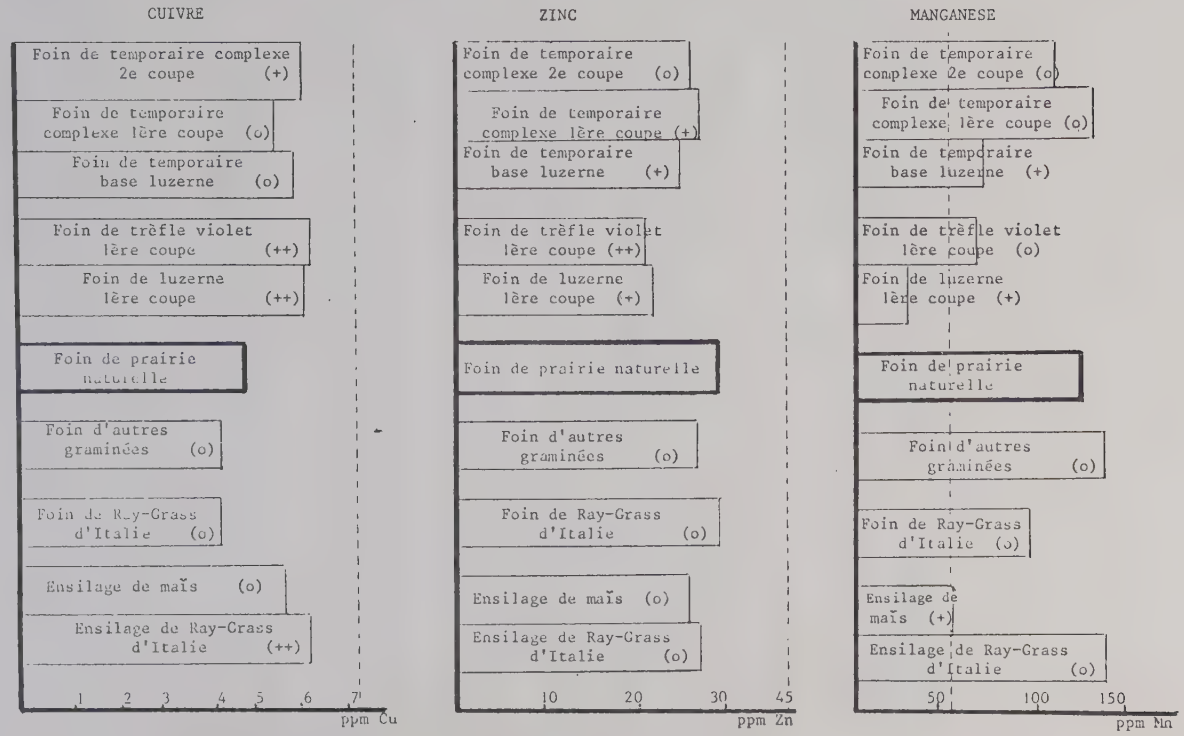
Tableau C 29 : Teneurs recommandées dans la matière sèche de la ration pour des bovins en croissance

| Eléments | Na | Zn | Fe | Mn | Cu | Co | I | Se |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teneur en mg/kg MS | 1 500 | 100 | 50 | 50 | 10 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

Le tableau C 30 indique les teneurs relatives en principaux oligo-éléments des fourrages. Les tableaux C 11 et C 13 de ANDRIEU (1978) donnent des valeurs précises.

Connaissant la quantité de matière sèche ingérée, il est ensuite facile de connaître la complémentation à apporter, en multipliant le déficit de chaque aliment par cette quantité de matière sèche.

Tableau C 30 : Teneurs relatives en Cu, Zn et Mn de différents types de fourrages (d'après PERIGAUD et al., 1972)




\+ Différence significative par rapport aux prairies naturelles

\----Limite de carence

++ Différence hautement significative

o Différence non significative

# CONCLUSION

A l'issue de ce travail, il apparaît que, si les besoins des animaux sont maintenant relativement bien connus et que de nombreux auteurs sont d'accord sur les recommandations, il est par contre beaucoup plus difficile d'apprécier de manière simple et rapide l'apport minéral de la ration, surtout si elle est à base de fourrages.

Le choix des matières premières à utiliser pour complémenter les rations, principalement pour le phosphore, est très important. Les matières premières conditionnent en effet l'efficacité et le coût du produit fini. Si le phosphore est souvent l'élément de base, il n'en demeure pas pour autant l'élément exclusif.

Il faut donc prendre en considération le prix et la présence des autres éléments minéraux.

Le choix d'un complément parfaitement adapté est délicat, car de nombreux facteurs interviennent depuis le sol jusqu'à l'animal en passant par la plante.

Pour établir une complémentation bien ajustée, il faudra donc connaître par l'analyse les teneurs des aliments en éléments minéraux et évaluer les capacités de production des animaux. Le reste se résumera à des calculs.

Nous constatons cependant que l'apport est à peu près constant pour une catégorie d'animaux et pour une ration donnée.

Vu : Le Professeur de l'Ecole Vétérinaire
rapporteur

Professeur GRIESS

Vu : Le Directeur de l'Ecole
Vétérinaire

Professeur R. LAUTIE

Vu, Le Président de la Thèse

Professeur ECALLE

VU ET PERMIS D'IMPRIMER
Toulouse, le
P/ LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE
PAUL SABATIER, et par délégation
LE VICE-PRESIDENT,

Professeur L. LARENG

# ANNEXE

## EXTRACTION DU PHOSPHORE PAR L'ACIDE CITRIQUE A 2 %

## (GUEGUEN, 1970)

1. Dosage du P et du Ca totaux du composé minéral

Effectuer ces dosages à l'aide des méthodes habituelles, en prenant soin de mettre préalablement en solution la totalité de P et de Ca de la prise d'essai et de procéder à une hydrolyse acide permettant de convertir en orthophosphates les méta- et polyphosphates éventuellement dans la solution.

2. Extraction à l'eau

Placer 1 g de composé minéral dans un bécher ou un Erlenmeyer et ajouter environ 80 $cm^3$ d'eau déminéralisée. Agiter périodiquement durant environ 1 heure, puis filtrer sur filtre sans cendre dans une fiole jaugée de 100 $cm^3$. Entraîner le résidu sur le filtre avec environ 20 $cm^3$ d'eau déminéralisée afin de compléter jusqu'au trait de jauge.

Faire sécher le filtre et son contenu dans une étuve et déterminer le poids sec du résidu insoluble.

Doser P et Ca dans la solution filtrée (après hydrolyse acide et dilution convenable).

Calculer les quantités de P et Ca solubilisées et, par différence, les quantités de P et Ca demeurant dans le résidu insoluble.

3. Extraction à l'acide citrique à 2 %

— Si le rapport Ca/P de la fraction insoluble dans l'eau est inférieur à 1,8 :

Placer le résidu insoluble dans l'eau (avec le filtre), dans une fiole de 100 $cm^3$ et ajouter x $cm^3$ d'acide citrique à 2 % (P/v), x étant calculé pour que l'on ait 100 $cm^3$ d'acide citrique à 2 % pour 1 g de résidu sec.

Agiter durant 2 heures, par retournements fréquents, ou à l'aide d'un agitateur mécanique. Filtrer sur filtre sans cendre dans une fiole jaugée à 100 $cm^3$. Ne pas rincer le résidu et le filtre avec une quantité supplémentaire d'acide citrique.

Compléter le filtrat à 100 $cm^3$ avec de l'eau et doser le phosphore (après hydrolyse acide et dilution convenable d'une fraction aliquote).

Calculer la quantité de P extraite par l'acide citrique à 2 %.

Ajouter les quantités de P trouvées dans les deux solutions aqueuse et citrique, et exprimer cette quantité totale en pourcentage du poids de phosphore total contenu dans 1 g du composé minéral.

— Si le rapport Ca/P de la fraction insoluble dans l'eau est supérieur ou égal à 1,8 :

Placer le résidu insoluble dans l'eau (avec le filtre) dans une fiole de 200 $cm^3$ et ajouter 2x ml d'acide citrique à 2 % (P/v), x étant calculé comme précédemment.

Procéder comme ci-dessus, mais en recueillant le filtrat dans une fiole de 200 $cm^3$. Mesurer la quantité de P extraite par l'acide citrique et exprimer la somme en pourcentage du poids de P contenu dans 1 g du composé minéral.

# BIBLIOGRAPHIE


1. Agricultural Research Council - The Nutrient Requirements of Farm Livestock, n° 2, Ruminants, Ed. Agric. Res. Counc., London, 1965.

2. AMBOULOU (D.), LAMAND (M.), RAYSSIGUER (Y.) - Chopping versus grinding and pelleting of hay : effect on availability of trace elements (Cu, Mn and Zn) and major elements (Ca, P, Mg).
Ann. Rech. vét., 1977, 8, 1-6.

3. AMMERMAN (C.B.), WING (J.M.), DONAVANT (B.D.), ROBERTSON (W.K.), FEASTER (J.P.), ARRINGTON (L.R.) - Utilization of inorganic iron by ruminants as influenced by form of iron and iron status of animal.
J. Anim. Sci., 1967, 2-6 2, 404-410.

4. AMMERMAN (C.B.) - Recent developments in cobalt and copper in ruminants nutrition.
J. Dairy Sci., 1970, 8, 1097-1100.

5. AMMERMAN (C.B.), MILLERS (S.) - Biological availability of minor mineral ions : a review.
J. Dairy Sci., 1972, 35 (3), 681-694.

6. ANDRIEU (J.) - Teneur en oligo-éléments des aliments. In : I.N.R.A. : Alimentation des Ruminants, Annexe 17-2, Ed. I.N.R.A. Publications, Versailles, 1978, 563-567.

7. ANKE (M.), GROPPEL (B.), RESSIG (W.)
Tierzucht, 1971, 25, 470.

8. BELLANGER (J.), LAMAND (M.), PERIGAUD (S.) - Carences en oligo-éléments chez les ruminants en France.
Ann. Rech. vét., 1973, 4 (4), 565-598.

9. BLAXTER (K.L.), ROOK (J.A.F.) - Experimental magnesium deficiency in calves.
J. comp. Pathol., 1954, 64, 176-186.

10. BLOOD (D.C.), HENDERSON (J.A.) - Médecine Vétérinaire, 2e Edit. française, Ed. Vigot Frères, Paris, 1976, 828-852.

11. BOEUF (H.) - Evolution de la qualité des composés minéraux : Aspects législatifs. In : E.D.E. de l'Orne : Complémentation Minérale et Vitaminique 12/09/1978, Sées, 1978.

12. CHAPMAN (H.L.), BELL (J.R.), BELL (M.C.) - Relative absorption and excretion by beef cattle of copper from various sources.
J. anim. Sci., 1963, 22 (1), 82-84.

13. COPPENET (M.) - Sur les variations de la composition minérale des graminées fourragères exploitées en régime de pâture.
C. R. Acad. Agric., 1964, n° 4.

14. COPPENET (M.), PERIGAUD (S.) - Possibilités d'enrichissement en oligo-éléments du maïs et des fourrages sur pied. Apports au sol et pulvérisations foliaires. VIIe Journées d'Information du Grenier de Theix, C.R.Z.V., Suppl. au Bull. Techn. du C.R.Z.V. Theix, 1975, p. 75.

15. DARTIGUES (A.) - Les déficiences en zinc chez les végétaux et leurs causes.
Ann. Agron., 1964, 15 (6), 667-691.

16. DEHOVE (R.) - La réglementation des produits alimentaires et non alimentaires : Répression des fraudes et contrôle de la qualité. 7e Edit., Commerce-Editions, Paris, 1971, p. 991.

17. DEMARQUILLY (C.), ANDRIEU (J.), SAUVANT (D.) - Composition et tableau de la valeur nutritive des aliments. In : I.N.R.A. : Alimentation des Ruminants, ch. 16-17, Ed. I.N.R.A. Publications, Versailles, 1978.

18. ELAM (J.) - Sulfur requirements of ruminants.
Feedstuffs, 1975, 1, 23-26.

19. FRITZ (J.C.) - Proc. Maryland Nutr. Conf. Fd Mf, 1969, 1-14.

20. GALLOT (L.) - Les déséquilibres en minéraux chez les bovins et leurs corrections.
Thèse Doct. vét., Lyon, 1977.

21. GARCES (M.A.), EVANS (J.L.) - Calcium and Magnesium absorption in growing cattle as influenced by age of animal and source of dietary nitrogen.
J. anim. Sci., 1971, 32 (4), 789-793.

22. GERKEN (H.J.), FONTENOT (J.R.), FONTENOT (J.P.) - Availability and utilization of magnesium from dolomitic limestone and magnesium oxide in steers.
J. anim. Sci., 1967, 26 (6), 1404-1407.

23. GUEGUEN (L.) - Les critères de qualité nutritionnelle des compléments minéraux en alimentation animale.
Bull. A.F.Z., 1970, 58 (9).

24. GUEGUEN (L.) - La complémentation minérale des régimes à base de céréales pour les ruminants. In : Utilisation des céréales dans l'alimentation des ruminants. Etude n° 53, Ed. S.E.I., Versailles, 1973, 127-131.

25. GUEGUEN (L.) - Le profil minéral alimentaire. In : Le Point Vétérinaire : Les minéraux et les vitamines, 1975, 2, 149-154.

26. GUEGUEN (L.) - Les recommandations pour l'alimentation des bovins en macro-éléments minéraux.
Bull. A.F.Z., 1977, 5-22.

27. GUEGUEN (L.) - Minéraux : Macro-éléments, ch. 4 - Bovins en croissance et à l'engrais, ch. 11. In : I.N.R.A. : Alimentation des Ruminants, Ed. I.N.R.A. Publications, Versailles, 1978.

28. GUNTHER (K.D.) - Sur la valeur en physiologie alimentaire des substances minérales ajoutées à la nourriture des animaux d'élevage. 2e Commun. Inf. Méd. vét., 1969, n° 2, 97-106.

29. GUNTHER (K.D.) In GUEGUEN (26)

30. HEMKENS (R.W.) - Iodine.
J. Dairy Sci., 1970, 35 (8), 1138-1143.

31. HINTZ (H.F.), HOGUE (D.E.) - Effect of selenium, sulfur and sulfur amino-acids on nutritional muscular dystrophy in the lamb.
J. Nutr., 1964, 82 (4), 495.

32. JARRIGE (R.), GUEGUEN (L.), ROBELIN (J.), THERIEZ (M.) - Croissance, ch. 8. In : I.N.R.A. : Alimentation des Ruminants, Ed. I.N.R.A. Publications, Versailles, 1978.

33. JARRIGE (R.), GUEGUEN (L.), VERMOREL (M.) - Entretien, ch. 7. In : I.N.R.A. Alimentation des Ruminants, Ed. I.N.R.A. Publications, Versailles, 1978.

34. LAMAND (M.) - Intérêt de la prophylaxie de la myopathie du veau par addition de Se aux compléments minéraux des mères.
Ann. Zootech., 1972, 21 (1), 29-35.

35. LAMAND (M.) - Pathologie des carences et des excès en oligo-éléments. Diagnostic des carences en oligo-éléments.
Utilisation digestive et métabolisme des oligo-éléments : les besoins de l'adulte et du jeune.
In : Le Point Vétérinaire : Minéraux et vitamines, 1975, 1.

36. LAMAND (M.), PERIGAUD (S.) - Méthodes de complémentation. In : Le Point Vétérinaire : Minéraux et Vitamines, 1975, 1.

37. LAMAND (M.) - Les recommandations pour l'alimentation des bovins en oligo-éléments minéraux. In : Alimentation Minérale des Bovins, Bull. A.F.Z., 1977.

38. LAMAND (M.) - Alimentation animale : Les oligo-éléments. C. r. IXe Journées du Grenier de Theix, Suppl. au Bull. Techn. du C.R.Z.V., 1978.

39. LAMAND (M.) - Minéraux : Oligo-éléments, ch. 4. In : I.N.R.A. : Alimentation des Ruminants. Ed. I.N.R.A. Publications, Versailles, 1978.

40. LAMAND (M.) - Le rapport sol-plante - Pathologie animale. C. r. 12e Grenier de Theix : Milieu - Pathologie et prévention chez les ruminants, Clermont-Ferrand, 1980.

41. LAMBERT (J.), TOUSSAINT (B.) - Phosphore et agriculture. N° 73, 32e année, Juin Isma Ltd, Paris, 1978.

42. MILLER (W.J.), BLACKMOND (D.M.), HIERS (J.M. et Jr.), FOWLER (P.R.), CLIFTON (C.M.), GENTRY (R.P.) - Effects of adding two forms of supplemental sinc to a practical diet on skin regeneration in Holstein heifers and evaluation of a procedure for determining rate of wound healing. J. Dairy Sci., 1967, 50 (5), 715-723.

43. MILLER (W.J.) - Zinc nutrition of cattle : a review. J. Dairy Sci., 1970, 53 (8), 1124-1128.

44. National Research Council - Nutrient Requirements of Domestic Animals. N° 4 : Nutrient Requirements of Beef Cattle, Pub. 1137, NAS Washington DC, 1963, 7-10.

45. NIKPOUR (K.), FALIU (L.), GRIESS (D.), PARAGON (B.) - Note sur la teneur en zinc et en cuivre de quelques graminées et légumineuses cultivées dans la région toulousaine. Revue Méd. vét., 1978, 129 (3), 469-489.

46. PERIGAUD (S.), BELLANGER (J.), LAMAND (M.) - Les oligo-éléments dans les foins en France. Revue Fourrages, 1972, n° 52.

47. PERIGAUD (S.) - Influence de la fertilisation sur la composition minérale des fourrages et la satisfaction des besoins en minéraux des ruminants. Bull. Techn. C.R.Z.V., Theix, 1975, n° 21.

48. PERIGAUD (S.) - Variations de la composition en oligo-éléments des fourrages. In : Le Point Vétérinaire : Minéraux et Vitamines, 1975, 1, 143-153.

49. PERIGAUD (S.) - Complémentation en oligo-éléments des ruminants à partir des fourrages enrichis sur pied. Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, 1976, 25, 35-44.

50. PFLIMLIN (A.) - L'étiquette et la législation. Dossier Technique B.I.E. ITEB, 1978.

51. PFLIMLIN (A.) - La complémentation minérale au pâturage pour les vaches laitières et les génisses. In : E.D.E. Orne, Alençon : Complémentation minérale et vitaminique, Sées, 1978.

52. PINOT (B.) - Résultats d'une enquête sur les compléments minéraux distribués aux bovins en Eure-et-Loir. In : Le Point Vétérinaire : Minéraux et Vitamines, 1975, 2, 227-238.

53. PLANCQUAERT (P.) - La composition chimique des fourrages. Persp. agric. I.T.C.F., 1979, n° 23.

54. RICART (J.L.) - Les compléments liquides dans l'alimentation des ruminants. Thèse Doct. vét., Toulouse, 1975.

55. ROCHET (M.), LEPASTEUR (J.) - Quel composé minéral acheter ? Orne Elevage Bull., 1974, n° 2.

56. ROCHET (M.) - Enquête sur les oligo-éléments : Relation sol-plantes. E.D.E. Orne, Alençon, 1977.

57. SAUVANT (D.) - La composition en éléments minéraux majeurs des aliments des ruminants. In : Le Point Vétérinaire : Minéraux et Vitamines, 1975, 1, 51-84.

58. THOMAS (J.) - Metabolism of iron and manganese. J. Dairy Sci., 1970, 53 (8), 1113-1117.

59. TOULLEC (R.), THIVEND (P.), VERMOREL (M.), GUEGUEN (L.) - Besoins en minéraux du veau préruminant. In : I.N.R.A. Alimentation des Ruminants, Ed. I.N.R.A. Publications, Versailles, 1978.

60. TOURNUT (J.) - Cours magistral de Pathologie du Bétail, E.N.V. Toulouse, 1978.

61. TROCME (S.) - Les carences minérales en France chez les plantes à destination fourragère (dont le maïs). VIIe Journées d'Information du Grenier de Theix, Suppl. au Bull. Techn. du C.R.Z.V. Theix, n° spécial, 1975.

62. UNDERWOOD (E.) - The mineral nutrition of farm livestock. F.A.O. Commonwealth Ed. Agric. Bureau.

63. UNDERWOOD (E.) - Trace elements in human and animal nutrition. Acad. Press New York & London.

64. WOLTER (R.) - Le diagnostic des déséquilibres en minéraux et vitamines par les profils biochimiques. In : Le Point Vétérinaire : Minéraux et Vitamines, 1975, 2, 158-160.

65. ZINTZEN (H.) - Fertilité et nutrition de la vache laitière. Conf. IIe Congrès de la Soc. Sud-Africaine de Product. anim., Johannesburg. Documentation Roche, Paris, 1972.